The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	3次元画像生成のための遮蔽領域の視差推定とアクティブレンジファインダの高機能化
Author(s)	吾妻, 健夫
Citation	大阪大学, 2005, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2041
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

3次元画像生成のための遮蔽領域の視差推定とアクティブレンジファインダの高機能化

吾妻 健夫

2004年12月

要旨

本論文は，3次元画像生成のための遮蔽領域における視差推定と高速・簡便なレンジファインダについての研究をまとめたものである．立体テレビ放送の実用化に有効な多視点画像の中間視点画像生成のための視差推定と，画像伝送の効率化や多様なコンテンツ生成を可能とする階層化のための高速レンジファインダと，一般ユーザの3次元画像取得を可能とする簡便なレンジファインダについて論じた．

第1章では，本研究の背景と目的を述べた．3次元画像の入力，処理，表示と階層符号化について概観し，研究課題と位置付けを述べ，関連研究を紹介した．

第2章では，中間視点画像の物体輪郭付近の画質に大きく影響する遮蔽輪郭近傍とオクルージョンでの視差推定方法について述べた．初期視差，輝度エッジ，色エッジの情報を用いた動的輪郭モデルを求め，そこで視差が不連続に変化する視差推定方法を提案した．次に，動的輪郭モデルを用いずに，任意形状の複数の物体輪郭線に対する視差推定方法を定式化した．得られた視差とステレオ画像から中間視点画像を生成し，有効性を確認した．

第3章では，高速な奥行き情報取得のための，マルチスリット方式レンジファインダについて述べた．基準視点となるカラーカメラの左右に4台ずつ赤外カメラを配置し，複数のスリット光を水平走査した．被写体からの反射光を8台の赤外カメラにより時分割撮像した．スリット光が検出された画素について，三角測量により三次元座標値を計測した．8つの異なる視点から得られた三次元座標値を視点変換し，カラーカメラ視点についての距離画像として統合した．これにより，距離画像の空間解像度を高め，また，オクルージョンでの計測値の欠落を補った．

第4章では，高速かつ高空間解像度で奥行き情報を取得するための，光強度変調方式レンジファインダについて述べた．レーザスリット光を回転ミラーで走査し，フィールド毎に光強度変調パターンを切り替え，2つの投射光の輝度比と画素座標値から三角測量により奥行きを計算することで，全画素についての奥行き値をビデオレートで得た．その際,（1）投射光以外の周囲の光による距離測定値のシフト（2）ビデオ信号のノイズによる距離測定値のばらつき

(3) 被写体の動きによる被写体の輪郭付近における距離測定誤差増加という3つの原因により精度が低くなることが課題となった．これに対し，(1) と (2) に対しては，レーザ光源と干渉フィルタを用いた狭帯域光計測を行った．(3) に対しては，動物体の輪郭付近で顕著に生じる距離誤差を低減するための，距離画像のフィールド間メディアン処理を行った．

第5章では，簡便な奥行き情報取得のための，ダブルストロボレンジファインダについて述べた．カメラに連続2回もしくは4回のストロボ撮影機能を追加し，ストロボ光源の前に位置をずらして窓を配置することで，光走査をせずにグラデーションパターンを得た．信号処理をPC上で行うことにより，簡単に奥行き情報を取得可能にした．この方式では，投射光が変調方向と垂直な方向にも変化したり，光源の大きさが無視できないために，奥行き誤差が生じるので，輝度比を光源からの角度に変換する係数をエピポーラ線毎に持つことによってこの問題を解決した．

第6章では，本研究で得られた成果をまとめ，今後の展開について述べた．

目 次

要旨 **i**

目次 **iii**

図目次 **vii**

表目次 **xi**

第 1 章　序論 **1**
1.1　本研究の背景 1
1.2　本研究の目的 3
1.3　取り扱う課題と関連研究 3
1.3.1　3 次元画像の入力: シーンから 3 次元情報を得るための能動的な方法 4
1.3.2　3 次元画像の処理: シーンから 3 次元情報を得るための受動的な方法 6
1.3.3　立体画像および 3 次元画像の表示 8
1.3.4　符号化 10
1.3.5　課題 1: 遮蔽輪郭近傍とオクルージョンでの視差推定 . . 12
1.3.6　課題 2: 高速な奥行き情報取得 12
1.3.7　課題 3: 簡便な 3 次元情報取得 12
1.4　本論文の構成 13

第 2 章　ステレオ画像の中間視点画像生成のための遮蔽領域の視差推定 **15**
2.1　まえがき 15
2.2　動的輪郭モデルによる物体輪郭線で不連続となる視差推定 . . . 17
2.2.1　初期視差推定 17
2.2.2　未対応領域での視差推定 18
2.2.3　物体輪郭線近傍での視差推定 20
2.2.4　中間視点画像生成 22

2.3 輝度エッジと初期視差からの視差エッジの自動推定 24
2.3.1 初期視差推定と初期視差の信頼性評価 25
2.3.2 物体輪郭線の自動検出 26
2.3.3 物体輪郭線付近での視差推定 27
2.3.4 視差推定結果 28
2.4 中間視点画像の定量評価 29
2.5 まとめ 32

第 3 章 複数カメラを用いたマルチスリット光の時分割撮影による光切断法の高速化 35
3.1 まえがき 35
3.2 マルチスリット方式 36
3.3 距離計測方法 40
3.3.1 キャリブレーション 41
3.3.2 スリット光の検出と同定 42
3.3.3 三次元座標値の計算 44
3.3.4 視点変換による距離データの統合 44
3.3.5 LUT 参照による一括計算 45
3.3.6 計測可能範囲 45
3.3.7 距離測定精度 46
3.4 水平解像度の改善と距離計測値の補間 47
3.4.1 オクルージョン発生位置の拡散と水平解像度の改善 . . . 48
3.4.2 距離データの補間結果を用いたカラー画像の切り出し . . 51
3.4.3 切り出し結果の比較 53
3.5 まとめ 58

第 4 章 レーザライン光走査による光強度変調方式レンジファインダのビデオレート動作 61
4.1 まえがき 61
4.2 レーザライン光走査による光強度変調方式 63
4.2.1 光強度変調方式 63
4.2.2 レーザライン光走査 63
4.2.3 回転ミラーの角速度制御による光強度変調 64
4.2.4 周辺減光対策 66
4.2.5 被写体の動きの影響低減 68
4.3 システム性能評価 75
4.3.1 信号レベルとノイズレベルの測定 75
4.3.2 被写体反射率の測定精度への影響 75

4.3.3 ビデオレート動作システムの試作 76
4.3.4 試作システムの距離測定精度 77
4.4 まとめ 78

第 5 章 ストロボ光源と遮光板を用いた簡便なレンジファインダ 81
5.1 まえがき 81
5.2 ダブルストロボレンジファインダ 82
5.2.1 測定原理 82
5.2.2 ダブルストロボ光源 83
5.2.3 信号処理 85
5.2.4 エピポーラ拘束を用いた輝度比からの角度推定 86
5.3 誤差要因の理論検討 87
5.3.1 線光源を用いることの影響 87
5.3.2 2 つの光源を用いることの影響 89
5.3.3 ビデオノイズの影響 90
5.3.4 影境界誤差領域 92
5.3.5 オクルージョン低減対策 93
5.4 実験・検討結果 95
5.4.1 キャリブレーション方法 95
5.4.2 キャリブレーション結果 96
5.4.3 考察 97
5.5 まとめ 98

第 6 章 結論 101

謝辞 105

参考文献 107

研究業績 116

付 録 A 有限要素法による視差推定の定式化 121

付 録 B キャリブレーション方法 125
B.1 基線長およびミラー回転中心の推定 125
B.2 光強度比，角度特性の較正 125

図 目 次

1.1 シーンから3次元情報を得る方法 4
1.2 立体/3次元画像の表示方式 9

2.1 中間視点画像生成処理の概要 16
2.2 原画像（左，620×450画素） 17
2.3 ブロックマッチングによる初期視差分布（左画像基準） 17
2.4 前景/背景視差領域と接する未対応領域 18
2.5 視差の不連続を保持した視差推定結果 20
2.6 物体輪郭線近傍における視差推定方法 21
2.7 物体輪郭線情報を用いた視差推定結果 22
2.8 初期視差を用いて生成した中間視点画像の前景
（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$） 23
2.9 提案手法による視差より生成した中間視点画像の前景
（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$） 23
2.10 提案手法による視差より生成した中間視点画像（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$） 23
2.11 視差エッジ自動検出処理のブロック図 25
2.12 初期視差推定時に対応付けの信頼性が低い領域（2値化の閾値：
1.0） 25
2.13 物体輪郭線検出のブロック図 26
2.14 検出された物体輪郭線
（σ_d: 低域3.0，中域1.5，高域0.75，$\sigma_\perp$: 6.0） 27
2.15 初期視差 28
2.16 提案手法による視差推定結果 28
2.17 中央視点での実写画像 30
2.18 中間視点画像生成時の画素移動量のサブピクセル精度に対する
PSNR値（Snakesによる輪郭を用いた結果） 30
2.19 中間視点画像生成時の画素移動量のサブピクセル精度に対する
PSNR値（ACDによる輪郭を用いた結果） 30
2.20 フラワーガーデンの第2フレーム 31

2.21 画素移動量のサブピクセル精度に対する中間視点画像の PSNR 値（Snakes を用いた結果） 31
2.22 画素移動量のサブピクセル精度に対する中間視点画像の PSNR 値（ACD による輪郭を用いた結果） 31
2.23 中間視点画像の予測誤差（$\alpha\, d(x, y)$ の精度 1/4 画素） 32

3.1 マルチスリット方式の構成 37
3.2 各カメラの露光タイミング 38
3.3 各スリット光の存在範囲 38
3.4 カメラ台の外観 38
3.5 距離計算の手順 40
3.6 スリット光位置の検出方法 42
3.7 回転ミラーのステップ駆動 43
3.8 信号処理部の構成 45
3.9 システム設定値と計測可能範囲 46
3.10 距離データの統合結果 48
3.11 フィールド間で異なるスリット光走査 49
3.12 4 フィールド周期のスリット光走査 50
3.13 カラー画像（640×480 画素） 51
3.14 距離画像 51
3.15 RGB の情報を用いずに補間した距離データにより切り出した前景 53
3.16 RGB の情報を用いて補間した距離データにより切り出した前景 54
3.17 形状既知の被写体（幅 225mm の矩形板） 55
3.18 RGB の情報を用いず補間した距離データにより切り出した前景 55
3.19 形状既知の被写体（直径 180mm の半円板） 57
3.20 RGB の情報を用いて補間した距離データにより切り出した前景 57

4.1 レーザ光走査による光強度変調方式 62
4.2 光強度比と光源からの角度 θ との関係 63
4.3 干渉フィルタの周辺減光特性 66
4.4 周辺減光対策を評価した距離画像中の領域 67
4.5 周辺減光対策による距離誤差の低減効果 67
4.6 被写体の動き影響 68
4.7 被写体の動きによる距離誤差 70
4.8 被写体の配置と動きの方向 71
4.9 被写体静止時の距離画像（幅 720，高さ 240 画素） 71
4.10 被写体静止時に計測される輪郭付近の形状 73

4.11 フィールド間メディアン処理による距離測定誤差の低減結果
（被写体動きＹ方向，4pixel/field） 73
4.12 フィールド間メディアン処理による距離測定誤差の低減結果
（被写体動きＺ方向，4pixel/filed） 74
4.13 動きと距離測定誤差の関係 74
4.14 信号レベルとノイズレベルの関係 75
4.15 距離測定値に対する被写体反射率の影響 76
4.16 ビデオレート動作システムの構成 77
4.17 試作機 (基線長 90cm) のヘッド部外観 78
4.18 試作機の距離測定精度 79

5.1 構成図 83
5.2 投射パターン光強度と光源からの角度の関係 83
5.3 遮光板を利用した光パターン生成 84
5.4 奥行き計算とカラー画像の信号処理ブロック図 85
5.5 エピポーラ面上の輝度比の分布 86
5.6 線光源によるパターン投影 87
5.7 線光源を用いることによる奥行き誤差 88
5.8 上下に配置した２つの光源による光投影 89
5.9 ２光源の上下配置による強度比への影響 90
5.10 光源の上下配置による奥行き誤差 90
5.11 奥行き画像内の水平位置と奥行き誤差の関係 91
5.12 奥行き誤差と基線長の関係 92
5.13 奥行き誤差と被写体反射率の関係 92
5.14 影境界誤差 93
5.15 影境界誤差の検出例・被写体切り出し実験例 94
5.16 光源を２セット化したヘッド部 95
5.17 奥行き画像の統合例 95
5.18 輝度比と θ の関係の実測値 96
5.19 ３通りのＺ値に配置した白色平板の計測結果 97

A.1 各要素における局所座標 122

B.1 等光強度比直線の分布 126
B.2 光強度比と角度情報の関係 126
B.3 較正面数と距離誤差の関係 127

表 目 次

2.1 中間視点画像の推定誤差および PSNR 値 24

3.1 マルチスリット方式の諸元 39
3.2 各スリット光の存在範囲の開始水平座標値 43
3.3 各スリット光の計測可能範囲 (mm) 47
3.4 距離測定精度 49
3.5 切り出し誤差の比較（RGB の情報を用いない補間） 53
3.6 切り出し誤差の比較（RGB の情報を用いた補間） 54
3.7 切り出し誤差の比較（矩形物体） 58
3.8 切り出し誤差の比較（半円形物体） 58

4.1 動く被写体についての光強度比 69
4.2 被写体に用いたカラーペーパーの色と色番号 76

第1章

序論

1.1 本研究の背景

本研究の背景は2つある．ひとつは立体映像システムに関するものである．テレビ放送は，モノクロからカラー，ハイ・ビジョンと進化してきた．次世代のテレビ放送として，立体テレビが期待されて久しい．1980年台後半から1990年代前半にかけて，Heinrich-Heltz-Institute [1–6]，NHK [7–10]，ATR [11–13]，NTT [14, 15] において精力的な研究が行われている．立体テレビに必要な3次元情報の取り扱いに関しては，撮像系，処理系，表示系においてそれぞれ課題がある．これらの全てが解決されないと，放送への適用は難しい．

撮像系については，複数のカメラを用いるものが最も一般的である．使用するカメラ台数および表示装置台数が多いほど，表示の際，観察者に対して自然な運動視差を感じさせることができ，また，多人数での観察も容易になる [16]．しかし，撮像系の規模が増大することやカメラ台数の増加に伴い光軸調整が困難になることから，実用的に用いることができるカメラ台数には限度がある．

表示側でのホログラム再生のために，動画ホログラムを撮影する試みもなされている [17]．しかし，ホログラム再生に必要なナノオーダーの干渉縞パターンを1/30秒の短時間に記録することは非常に難しく，解像度の点で課題がある．

処理系については，異なる視点で撮影された画像間の対応関係を視差として求めて奥行き情報を復元する研究が，Marr [18] の $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチをはじめとして行われてきた．Marr は上記奥行き情報の復元が，本質的に不良設定問題であることを指摘している．Poggio ら [19] は，不良設定問題を解く枠組みとして，標準正則化理論を示している．これは，一意に定まらない解に対して滑らかさの拘束条件を与えることにより，不良設定問題を良設定問題化するものである．標準正則化理論では，最小化すべき評価関数が2次関数として与えられる．そのため，視差が不連続に変化する物体輪郭付近において正しく推定できない．これに対して，Poggio ら [20] は，Geman ら [21] の提案したラインプロセスの導入による不連続の表現を，色，テキスチャ，動き，視差に適用し

ている．Poggio らは，不連続はこれらの異なる手がかりにおいて，同時に生じることに着目し，不連続に関する情報を統合することを試みている．また，Anandan [22] は，対応付けの際に信頼性の評価尺度を導入している．この信頼性を考慮した正則化により，不連続に変化する視差を推定している．

得られた視差情報を用いて，実際に撮影した視点間，すなわち，中間視点における画像を生成することが試みられてきた [4, 5, 23–25]．また，Epipolar Plane Image（EPI）の補間により，視差情報を明に使わずに中間視点画像を生成する方法も提案されている [26–28]．

表示系については，ホログラムを動画化することが，原理的に最も自然な立体表示方法であることは明らかである．Benton ら [29, 30] の先駆的な研究により，計算機によって生成した縦横 10cm のホログラムが動画表示されている．原理的な可能性を示した点で，非常に有意義であるが，高画質のホログラム再生に必要なナノオーダーの干渉縞パターンを動的に生成することは非常に難しく，この点で実用化への道は依然遠い．

ホログラム以外の表示方式としては，レンチキュラレンズ，パララックスバリア等の指向性を持った表示デバイスによる多視点画像表示方式 [1, 7–9, 14, 16, 31] が有望である．

本研究のもう一つの背景は，近年の急速なネットワークの普及に関するものである．ここ数年の間に，インターネットは一般家庭へ普及し，また，ディジタル衛星放送も開始された．これにより，ディジタル動画像が身近なものとなってきている．動画像圧縮符号化の次世代標準方式である MPEG4 [32] では，動画像をオブジェクト毎に階層化（部品化）し [33] 符号化することが提案されている．画像の部品化により，伝送路の状態や送信側，受信側の意図を反映したオブジェクト毎の情報量（画像の場合画質）の制御が可能となる．部品化し画質制御した前景や背景をさし替えることで，多様な映像コンテンツを容易に作成できるようになる．

現状では，実写画像のオブジェクト階層化をオンライン処理しようとすると，クロマキー技術を用いる大がかりなスタジオセットが必要となり，自然画像を精度よくオブジェクト階層化しようとすると，手作業による繁雑な切り出し作業が必要となる．これらの課題を解決するためには，通常のカラー映像と同時に距離情報を撮像し，距離によって被写体を分離する奥行きベースの階層化技術が有効である [34]．

また，2000 年以降の ADSL，FTTH の普及によってネットワークの広帯域化が急激に進んでいる．ネットワーク上で立体情報をやりとりすることにより，平面的な画像だけでは伝えきれない情報を伝えることが可能となる．そのためには，大がかりで高価な装置を必要としない，簡便な奥行き情報の取得が必要である．

1.2 本研究の目的

本研究の目的は,

1. 3 次元映像システムの撮像系，処理系のための奥行き情報を用いた中間視点画像の生成
2. 奥行き情報を用いた画像の階層化のための高速な奥行き情報取得
3. ネットワーク上に立体コンテンツを流通させるための簡便な奥行き情報取得

を確立することである．

第 1 の目的のためには，オクルージョンの取り扱いが課題となる．ひとつの方法として，オクルージョンにおける奥行き情報を周囲の情報によって補うことが考えられる．他の方法としては，使用するカメラ台数を増やして，オクルージョンを低減することが考えられる．しかし，カメラの大きさによる物理的な制約や，転送，蓄積に要する情報量の制約等により，実用的に用いることができるカメラ台数には限度がある．本研究では，エッジ情報を用いた視差推定により，オクルージョンにおける視差を周囲の視差を用いて補間する．

第 2 の目的のためには，ビデオレートで撮影される動画と同じフレームレートで奥行き情報を取得する必要がある．この目的に対して，筆者らの取り組みとほぼ同時期に，数 10MHz の高速変調光と高速シャッターの組み合わせによる方式が提案されている [35, 36]．本研究では，このような高速変調を用いずに，60Hz の光走引によりビデオレートで奥行き情報を取得する．

第 3 の目的のためには，大がかりな装置や専用の素子を用いずに，誰もが簡便に利用できるシステムが必要である．現在市販されているレンジファンダは，低価格のものでも百万円から数百万円しており，個人で所有するには高額である．本研究では，カメラに連続 2 回もしくは 4 回のストロボ撮影機能を追加し PC 上で信号処理することで，簡便安価な奥行き情報取得が可能な方式を提案する．

1.3 取り扱う課題と関連研究

シーンから 3 次元情報を得る方法は，図 1.1 に示す様に，能動的な方法と受動的な方法に大別できる．ここで，能動的な方法を 3 次元画像画像の入力方法，受動的な方法を 3 次元画像画像の処理方法と捉え，以下に 3 次元画像の入力，処理，表示，および，階層符号化について概観する．

- 能動的な方法
  - 三角測量に基づく方法
    - スポット光を走査する方法
    - ライン光を走査する方法
    - パターン光を投射する方法
  - 光の飛行時間を測定する方法
    - パルス光を用いる方法
    - 変調光の位相差による方法
- 受動的な方法
  - ステレオ法
    - ブロックマッチング法
    - こう配法
  - 陰影による方法
  - レンズ焦点法
  - 特徴点を追跡する方法
  - 視体積交差法

図 1.1: シーンから3次元情報を得る方法

1.3.1　3次元画像の入力: シーンから3次元情報を得るための能動的な方法

能動的な方法としては，被写体に光を投射しこれをカメラで撮影するものが種々提案されており，三角測量に基づくものと光の飛行時間（Time of Flight: TOF）を測定するものに大別される．前者には，スポット光やライン光を走査する方法，光走査を不要とするためにパターン光を投影する方法がある．後者には，パルス光を投射してTOFを直接測定するものと，変調光を投射して反射光との位相差から間接的にTOFを測定するものがある．

三角測量に基づく方法

スポット光を走査する方法として，Rioux [37] は，角錐ミラーとPSD（Position Sensitive Detector）を用い，光源部のレーザビーム走査と同期して受光部でレーザビーム像を偏向することにより，計測の高速化と計測可能範囲の拡大を行い，250mm×250mm×100mmの範囲を計測している．

ライン光を走査する方法は，光切断法として知られるものである [38]．計測に要する時間を短縮するために，吉見ら [39] は 15 本のレーザライン光をバイナリコーディングによって点滅させ，4 フレームで 15 本のレーザライン光について計測する方式を提案している．Gruss ら [40] は，専用の素子により光切断法を高速化し，28×32 画素の距離画像を 0.1msec で計測している．また，荒木ら [41] は，30 チャンネルの PSD アレイを用いて光切断法を高速化している．

スポット光やライン光を用いる方法では，計測点を増やすために光を走査する必要があるが，この光走査が不要なパターン光を投影する方法が種々提案されている．佐藤ら [42] は，コード化したパターン光を投影し，撮像した画像からローカルにコードを抽出し距離を求める方式を提案している．この方式では，計測のために複数回のパターン光投影が必要であり，パターン光投影に要する時間によって計測時間が決まる．コード化パターンの投影を高速化するために，光源の前に液晶パネルを配置する方式 [43] や，レーザ光をスイッチングしながら走査する方法 [44] が提案されている．しかし，1 画面の距離計測に数フレーム以上の時間がかかるため，動く被写体は計測できない．

田島ら [45] は，白色光源からのスリット光を回折格子によって回折させ，被写体からの回折光の反射光をカメラで撮像する方式（レインボウレンジファインダ）を提案している．これは，投影光の色として光源からの角度情報が表現されるため，1 回の投影で距離計測できる点で実時間処理に適している．しかし，回折格子は回折効率が波長によって大きく変化するため，広い波長域において投影光に大きなパワーを与えることができず，計測可能な距離範囲と角度範囲を広くできない．

正弦波パターンを投影し，被写体までの距離に応じた位相のずれから，各画素についての距離を計算する方法（位相シフト法）も提案されている [46]．位相シフト法では，位相の異なる投射光パターン 3 枚についての画像から距離を計算する．3 枚の画像は,（1）時分割方式,（2）キャリアを用いる方法（電子モアレ位相シフト法）（3）偏光もしくは波長多重（リアルタイム位相シフト法），のいずれかの方法によって得られる.（1）の時分割方式では，2 枚の画像から距離を計算する光強度変調方式と較べ，被写体の動きの影響をより強く受ける.（2）のキャリアを用いる方法は，キャリアを用いるために空間分解能が犠牲となる.（3）の光多重方式は，光学系が複雑になるが性能は最もよい．しかしいずれも，絶対距離が求められないこと，位相が 0 から 2π の範囲で折り返されるため，位相接続処理が必要なこと，2π 以上の位相差のある距離の正しい計測が難しいことが課題である．

Carrihill [47] は，スライドプロジェクタにより投射される 2 通りの光強度変調パターンの強度比から光源からの角度を得，これとカメラからの角度，基線長を用いた三角測量により，画素毎に被写体の距離情報を計算する方式（光強

度変調方式）を提案している．

光の飛行時間を測定する方法

被写体にレーザパルス光を投射し，被写体からの反射光を受光するまでの時間を測る方法，すなわち，光の飛行時間から被写体までの距離を測る方法は，Time of Flight（TOF）法として古くから行われている [48].

また，光の飛行時間を直接測る代わりに，投射光を時間的に強度変調し，これと受光した反射光との位相差から，光の飛行時間を測る方法も提案されている [49]．この方法では，位相シフト法と同様に，位相が 0 から 2π の範囲で折り返されるため，位相接続処理が必要なこと，2π 以上の位相差のある距離の正しい計測が難しいことが課題である．

1.3.2　3 次元画像の処理: シーンから 3 次元情報を得るための受動的な方法

受動的な方法としては，ステレオ法，陰影による方法，レンズ焦点法，視体積交差法等が代表的である．

ステレオ法

ステレオ法では，画像間で画素の対応を求めて奥行きを推定する．対応を求める方法はこう配法と領域間の輝度差に基づく方法に大別される [50]．勾配法 [51–53] は，大きな推定値に対して精度が低下し，また，勾配を用いているためにノイズの影響を受けやすい．さらに，勾配法では特徴点についてのみ推定値が得られるため，画像全体について推定値を得るには，推定値の分布について定義したエネルギー場を最小化する収束計算等が必要となり，実時間処理の点で不利である．一方，領域間の輝度差に基づく方法 [22, 54] はノイズに対して頑健であるが，輝度勾配の大小，推定値が不連続な領域の有無によって，推定に適する領域のサイズが異なり，このサイズが推定値の分布に依存するという問題点がある．

金出ら [55] は，輝度勾配，ノイズ，視差分布を考慮した評価尺度を用いて，対応点探索に用いる窓領域のサイズを適応的に変化させることにより，上記問題点の解決を試みている．

陰影による方法

物体表面を観察したときの明るさは，照明条件（光源の強度と方向），物体表面の方向と反射率特性，および，観察者（もしくはカメラ）の物体表面を見る角度によって決まる．陰影による方法（shape from shading 法）は，照明条件と被写体の反射率特性を既知として，一枚の濃淡画像から 3 次元情報を復元する．一枚の濃淡画像に対応する 3 次元形状は複数存在するため，解は一意に決まらない．そのため，何らかの拘束条件を設ける必要がある．

Ikeuchi と Horn [56] は,「光源と観察者が物体から十分遠くにある」と仮定して問題を単純化し，さらに，遮蔽輪郭線において表面の法線と輪郭の法線が一致することに着目し，滑らかさの拘束条件のもとで反射地図の利用を可能にしている．

これを拡張した照度差ステレオ (photometric stereo）法 [57, 58] では，被写体の反射率が既知の場合には 2 枚の画像から，反射率が未知の場合には 3 枚の画像から，それぞれ，面の放線方向を求めることにより 3 次元情報を復元する．

レンズ焦点法

レンズ焦点法（depth from focus 法）は，フォーカス位置の異なる複数の画像を撮像し，各画素について最もフォーカスがあったものを選択することにより，被写体の奥行きを得る方法である [59–63]．depth from focus 法ではフォーカスがあった画像を含む必要があるが，これに対して，画像のボケ具合の変化から合焦位置を予測することで，ぼけのある複数の画像から被写体の奥行きを得る depth from defocus 法が提案されている [64–66]．

これらの方法は，簡単なアルゴリズムで奥行き情報を得られる点が長所である．しかし，被写界深度が深くなる条件下（被写体がカメラから離れている場合や，明るいシーンで絞りが閉じ F 値が大きい場合）では精度のよい奥行き情報が得られないことと，エッジ以外の点について奥行きが得られないことが課題である．

視体積交差法

視体積交差法は，ひとつの視点における被写体の見え（輪郭）によって，三次元中の被写体の存在位置が限定されることに基づく．複数視点からの輪郭情報を用いると，最終的な被写体の存在範囲は，個々の視点についての存在範囲が交差する範囲となる．複数視点からの輪郭情報を用いる代わりに，回転台の上の被写体を固定カメラで撮影し，形状を復元する手法が提案されている [67–69]．

視体積交差法では，測定できる形状が凸物体に限られることや，正確な形状を求めるためには多数の視点からの画像が必要であることが課題である．

1.3.3　立体画像および3次元画像の表示

立体画像と3次元画像の各種表示方式の分類を図 1.2 に示す [70]．ここで，立体画像とは，一定位置における2視点画像（ステレオ画像）である．立体画像の表示では，観察者の位置に応じた表示は行えないため，運動視差は表現できない．一方，3次元画像とは，3視点以上の複数視点からの画像（多視点画像）や，レンジファインダによる計測画像，ホログラム，3次元 CG データの様に，形状情報を含むものである．3次元画像の表示では，観察者の位置に応じた表示，すなわち，運動視差を表現できる．

表示方式は，のぞき式や眼鏡式の様に観察者に姿勢や機器装着の負担を強いるものと，眼鏡なし式やホログラフィーの様に観察者に負担を強いないものに大別できる．

観察者に負担を強いる方式: のぞき式，メガネ式

のぞき式としては，ハーフミラーやプリズムにより，2視点以上の方向から撮影した画像を表示するものがある．

眼鏡式としては，赤青眼鏡を用いるアナグリフ式（赤青眼鏡式），プルリッヒ効果 [71] により観察者に立体感を感じさせる濃度差式，偏光フィルタを用いる偏光式，視覚の残像効果特性を利用した時分割式がある．プルリッヒ効果とは，片方の目に光を減少させる ND フィルタをつけて観察すると移動物の奥行きが実際の奥行きと異なって知覚される現象である．

観察者に負担を強いない方式: 眼鏡なし式，ホログラフィー

眼鏡なし式としては，レンチキュラレンズによる光の屈折により表示に指向性を持たせたレンチキュラ方式 [31] と，パララックスバリアによる機械的な遮光により同様の指向性を持たせたパララックスバリア方式がある．現時点では，3次元画像の動画表示にはこれらの方式が最も有望である．

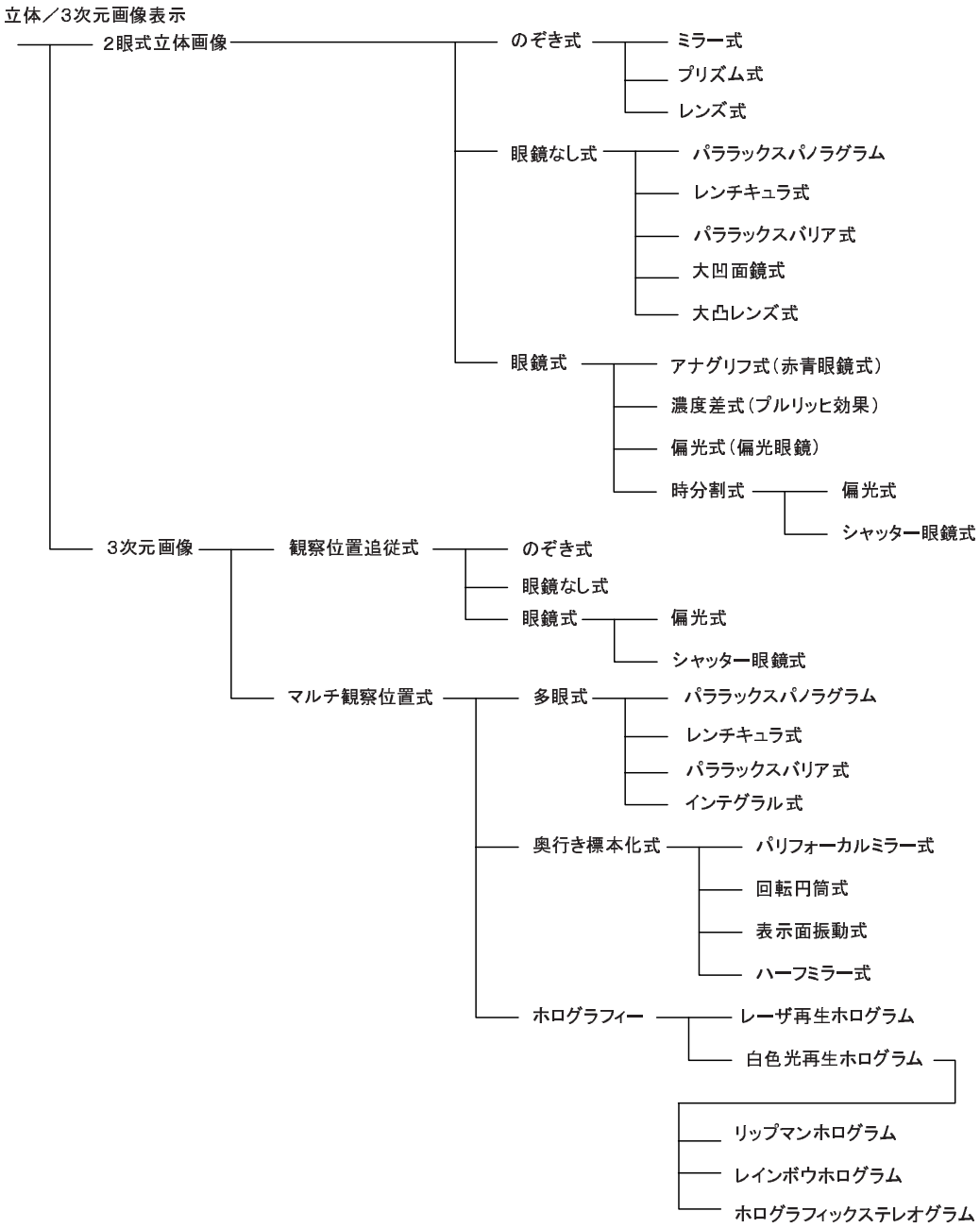


図 1.2: 立体/3 次元画像の表示方式

ホログラフィーは，位相と波長の揃った光（コヒーレント光）を被写体に照射し，被写体の形状に応じて変化する反射光の位相を干渉縞として記録し，記録された干渉縞によって生じる光の回折現象を用いて像を再生するものである [72]．記録時には，コヒーレント光源としてレーザを用いる．レーザ光を2分し，一方を被写体に照射し，他方（参照光）と被写体からの反射光（物体光）との干渉縞を写真フィルムの様な感光材料に記録する．干渉縞を記録し現像処理したものをホログラムと呼ぶ．再生時には，ホログラムに記録時と同様の参照光を照射すると，ホログラムに記録された干渉縞によって参照光が回折し，像が再生される．再生時の光源は，記録時と同様のレーザ光が望ましいが，レーザ光以外に白色光での再生が可能な白色光再生ホログラムがある．リップマンホログラム [73] では，感光材料中で立体的に干渉縞を記録することで，白色光再生時でもレーザ光再生時と同様の高い波長選択性を得ている．また，レインボウホログラム [74] では波長オーダーの凹凸を記録することにより，光路差で生じる回折により像を再生する．この時，波長選択性が観察方向（反射方向）によって連続的に変化し，像が虹色に見える．このため，レインボウホログラムと呼ばれる．

これら従来のホログラフィ技術により，運動視差を含む自然な3次元画像を表示できる．ホログラム再生を動画化することが，原理的に最も自然な立体表示方法であることは明らかである．しかし，上述の様に干渉縞の再生には一般に現像処理を伴うので，動く被写体を動画として表示することが困難である．これに対し，Benton ら [29, 30] は，計算機によって生成した縦横 10cm のホログラムの動画表示を実現している．原理的な可能性を示した点で，非常に有意義であるが，高画質のホログラム再生に必要なナノオーダーの干渉縞パターンを動的に生成することは非常に難しく，この点で実用化への道は依然遠い．

1.3.4　符号化

当初符号化は，アナログ量である入力信号をデジタル量に変換するだけのものであった．パルス符号化方式（Pulse Code Modulation: PCM）は，標本化と線型量子化により，本来アナログ値である入力信号をデジタル化するものである．PCM では，画像に含まれる冗長性は圧縮されない．画像の場合，時間的，空間的に冗長な情報を多く含んでいる．そのため，これに着目して，情報量を圧縮する試みがなされてきた．

圧縮符号化

変換符号化では圧縮が可能である．Rao ら [75] により提案された離散コサイン変換（Discrete Cosine Transform: DCT）により，画像情報に含まれる空間的な冗長性を大幅に圧縮できるようになった．静止画符号化方式である JPEG [76] では，入力画像を DCT した後，量子化した DCT 係数をエントロピー符号化することにより，DCT 係数に含まれる統計的冗長性を除いている．

さらに，MPEG1 [77] では，動き補償の追加により時間方向の冗長性についても圧縮できるようになった．また，MPEG2 [78] では，インターレースにも対応し，HDTV を含む様々なフォーマットに対応している．

階層符号化，スプライト符号化

MPEG2 までの符号化方式では，画像を 16×16 画素の小ブロック領域とその並進動きとして記述していたが，MPEG4 [32] では，新たに画像をオブジェクト階層化 [33, 79] し，オブジェクトの 2 次元的な形状情報も含めて符号化する方式が提案されている．

また，MPEG4 では，以下に示すスプライト符号化も提案されている．スプライト符号化方式では，画像シーケンスから一枚の広範囲な画像（スプライト画像）を予め生成し，まずこれを伝送する．再生時には，スプライト画像伝送後，平面透視投影（homography）の 8 パラメータや，2 次元アフィン変換の 6 パラメータを伝送するだけで，画像を復元する．

上記画像の生成は，スプライト画像生成もしくはビデオモザイクとして研究されている．Milgram [80] は，人工衛星や航空機で撮影した画像をモザイキングしている．Burt [81] らは，軍用車両に載せたカメラの画像のぶれ補正のために，アフィン変換を用いたモザイキングを行い，モザイク画像と現フレームとの差分から移動物体の検出を行っている．Chen [28] は，レンズ中心を回転中心としてカメラをパン，チルトさせて撮影した画像から全周囲についてのモザイク画像を生成し，複数地点についてのモザイク画像の切り替え提示によってウォークスルー表示を可能にしている．これらの方法では，静止した被写体に対するモザイク画像 (static mosaic) が生成される．また，モザイク画像は背景面として生成され，形状情報は含んでいない．

これに対し，Irani ら [82] は，時間を考慮した処理により現フレームに対するモザイク画像を生成し，これを dynamic mosaic と呼んでいる．Etho ら [83] は，ブロックマッチングを 2D アフィン，2D2 次形式，平面透視投影に拡張し，得られた動きを用いてモザイキングを行っている．この時，時間方向にメディアン処理することにより，静止したシーン中の移動物体を除去している．

形状情報を考慮した方法として，Jailon ら [84] は，粗い形状モデルと透視投

影変換を用いたモザイキングを行っている．Szeliski [85] は，静止したシーンについてカメラを移動させて撮影した画像シーケンスから，シーンの奥行きを復元し，3次元透視投影によりモザイク画像を生成している．Sawhney ら [79] は，画像シーケンス中の動きを，複数の支配的な動きに分類し，静止したシーンの形状復元と移動物の分離を同時に行っている．

これらモザイク処理では，2次元的な処理の場合，被写体が近い場合に視差情報を表現できないことが課題となる．3次元的な処理の場合，形状の復元に多くの演算が必要であり，現状ではオンライン処理に向かない．時間メディアン処理により移動物体を除去する場合には，半分以上の画像において背景側が見えている必要がある．

1.3.5　課題1: 遮蔽輪郭近傍とオクルージョンでの視差推定

画像間の対応づけにおける根本的な問題は，奥行きが不連続に変化する視差エッジ近傍では，オクルージョンが生じるために対応を精度良く求めるのは困難なことである．しかし，この視差エッジ近傍での推定値は，生成された中間視点画像中の物体輪郭の位置を決定するため，画質に大きく影響し非常に重要である．

1.3.6　課題2: 高速な奥行き情報取得

従来のアクティブレンジファインダにおいては，高速な動作と計測点数（距離画像の空間解像度）が両立しないことが課題であった．

この課題に対し，河北ら [35] は，LED アレイによる投射光を高速変調し，反射光の位相を検出し，光の飛行時間に基づく TOF（Time of Flight）法により，各画素についての距離を計算する方式（Axi-Vision camera）を提案している．また，Iddan [36] らは，一定時間幅の光パルスを被写体に照射し，反射光の受光をシャッターを用いて特定のタイミングの前後に2分し，シャッタータイミングより前の受光量と全受光量の比より各画素における奥行きを計算している．これらの方法では，非常に高速な光変調とシャッター動作が必要となる．

1.3.7　課題3: 簡便な3次元情報取得

ネットワーク上に立体コンテンツを流通させるには，誰もが手軽に立体情報を得られる様にするための，個人ユースの簡便な3次元情報取得システムを実現することが課題である．現状の3次元情報取得システムでは，装置規模が非

常に大がかりであったり，開発コストが高価なために，個人用途に適したものがない．

1.4 本論文の構成

第2章では，課題1に対して，中間視点画像の物体輪郭付近の画質に大きく影響する遮蔽輪郭近傍とオクルージョンでの視差推定方法について述べる．ステレオ画像対の双方向からの対応付けを行い，対応付けの信頼性評価値と輝度エッジの双方を考慮して，視差を推定する．複数のブロックサイズによって求めた視差の統合結果を初期視差とする．これと輝度エッジ，色エッジの情報を用いた動的輪郭モデルを求め，得られた物体輪郭線において視差が不連続に変化する視差推定方法を提案する．次に，動的輪郭モデルを用いない物体輪郭線検出の自動化について検討し，任意形状の複数の物体輪郭線に対する視差推定方法を定式化する．得られた視差を用いて，一組のステレオ画像から，ステレオ画像の中間の視点，すなわち，実際に撮影した視点と異なる視点における画像を生成し，有効性を確認する．

第3章では，課題2に対して，高速な奥行き情報取得のための，複数のスリット光と複数の赤外カメラを用いた光切断法によるマルチスリット方式レンジファインダについて述べる．基準視点となるカラーカメラの左右に4台ずつ計8台の赤外カメラを配置し，複数のスリット光を水平走査する．被写体からの反射光を複数の赤外カメラによりフィールド期間内に時分割撮像する．スリット光が検出された画素について，三角測量により三次元座標値を計測する．各赤外カメラによって異なる視点で得られた三次元座標値を視点変換し，カラーカメラ視点についての距離画像として統合する．これにより，距離画像の空間解像度を高めるとともに，オクルージョンでの計測値の欠落を補う．

第4章では，課題2に対して，高速かつ高空間解像度で奥行き情報を取得するための，光強度変調方式レンジファインダについて述べる．レーザ光源，回転ミラー，カメラをフィールド周波数（60Hz）で同期制御し，フィールド毎に光強度変調パターンを切り替え，2つの投射光の輝度比と画素座標値から三角測量により奥行きを計算することで，全画素についての奥行き値をビデオレートで得る．その際,（1）投射光以外の周囲の光（背景光）による距離測定値のシフト（2）ビデオ信号のノイズによる距離測定値のばらつき（3）被写体の動きによる，被写体の輪郭付近における距離測定誤差の3つの原因により精度が低くなることが課題となる．これに対し,（1）と（2）に対しては，レーザ光源と干渉フィルタを用いた狭帯域光計測を行う.（3）に対しては，動物体の輪郭付近で顕著に生じる距離誤差を低減するための，距離画像のフィールド間メディアン処理を行う．

第5章では，課題3に対して，簡便な奥行き情報取得のための，ダブルストロボレンジファインダについて述べる．カメラに連続2回もしくは4回のストロボ撮影機能を追加し，ストロボ光源の前に位置をずらして窓を配置することで，光走査をせずにグラデーションパターンを得る．信号処理をPC上で行うことにより，簡単に奥行き情報を取得可能にする．この方式では，投射光が変調方向と垂直な方向にも変化したり，光源の大きさが無視できないために，奥行き誤差が生じるので，輝度比を光源からの角度に変換する係数をエピポーラ線毎に持つことによってこの問題を解決する．

第6章では，本研究で得られた成果をまとめ，今後の展開について述べる．

第2章

ステレオ画像の中間視点画像生成のための遮蔽領域の視差推定

2.1 まえがき

視点の異なる画像から，その間の視点で見えるべき中間視点画像を生成するためには，画像間で画素の対応を求めて奥行きを推定する必要がある [10, 27, 55, 86]．対応を求める方法は勾配法とブロックマッチング法に大別される [50]．勾配法は，大きな推定値に対して精度が低下し，また，勾配を用いているためにノイズの影響を受けやすい．さらに，勾配法では特徴点についてのみ推定値が得られるため，画像全体について推定値を得るには，推定値の分布について定義したエネルギー場を最小化する収束計算等が必要となり，実時間処理の点で不利である．一方，ブロックマッチング法はノイズに対して頑健であるが，輝度勾配の大小，推定値が不連続な領域の有無によって，適切なブロックサイズが異なり，適切なブロックサイズが推定値の分布に依存するという問題点がある．

金出ら [55] は，輝度勾配，ノイズ，視差分布を考慮した評価尺度を用いて，上記問題点の解決を試みているが，最適サイズのブロック位置決定のための探索計算と，視差推定時の収束計算のために計算量が増大する．

また，勾配法やブロックマッチング法による 2 画像間の対応づけ以外の方法として，アフィン変換による視差補償予測方式 [86] や，EPI（Epipolor Plane Image）を用いる方法 [25, 27, 87] があるが，数枚から数十枚の画像を用いるため，動画に適用する際には撮像系に大きな負担がかかる．

画像間の対応づけにおける根本的な問題は，奥行きが不連続に変化する視差エッジ近傍では，オクルージョンが生じるために対応を精度良く求めるのは困難なことである．しかし，この視差エッジ近傍での推定値は，生成された中間視点画像中の物体輪郭の位置を決定するため，画質に大きく影響し非常に重要である．

上記問題に対し，金出らの方法 [55] ではオクルージョンを明確には考慮し

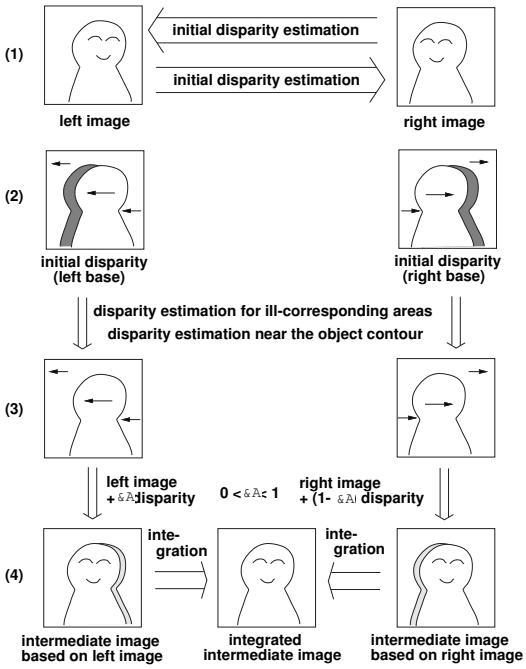


図 2.1: 中間視点画像生成処理の概要

ていないため，オクルージョン内での視差推定値が収束しない可能性がある．また，Fua[88] はステレオ画像についての双方向のマッチング結果から各画素についての対応関係の有無を検出し，対応関係の有無，輝度勾配，視差勾配で重みづけした視差分布のエネルギー場を画像全体について定義し，これを収束計算により最小化して視差を推定しているが，画像全体についてエネルギー最小化の収束計算をしているため計算効率が悪い．

これらに対し本研究では，ステレオ画像間で対応関係のない領域，すなわち画像内の一部の領域についてのみ視差を再計算することと，視差の再計算時に収束計算をしないことにより，物体輪郭線近傍での視差推定における解の収束に関する問題の回避と視差推定計算の高速化を図る．本論では，複数のブロックサイズによって求めた視差の統合結果を初期視差とし，これと輝度エッジ，色エッジの情報を用いた動的輪郭モデルを求め，得られた物体輪郭線において視差が不連続に変化する視差推定方法を提案し，その有効性について検討する．次に，動的輪郭モデルを用いない物体輪郭線検出の自動化について検討し，任意形状の複数の物体輪郭線に対する視差推定方法を定式化し，有効性を確認する．

図 2.2: 原画像（左，620×450 画素）

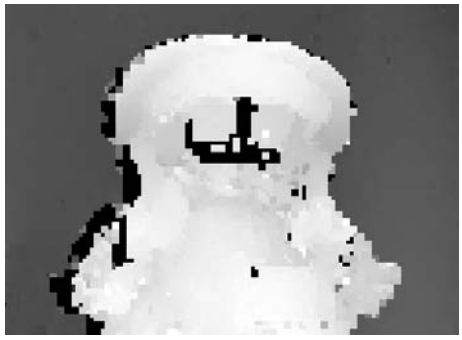


図 2.3: ブロックマッチングによる初期視差分布（左画像基準）

2.2　動的輪郭モデルによる物体輪郭線で不連続となる視差推定

実際に撮像した画像と視覚上同程度の画質の中間視点画像を生成するために，異なるサイズのブロックマッチングによる推定値の統合結果を初期視差推定値とし，さらに，輝度エッジ，色エッジの情報を用いて，物体輪郭線で不連続となる視差推定を提案する [89, 90].

図 2.1 に提案手法による処理の概要を示す．提案手法では，

（1） 初期視差推定

（2） 未対応領域での視差推定

（3） 物体輪郭線近傍での視差推定

の 3 段階の処理によって視差を推定する．そして，

（4） 中間視点画像生成

において，左右の画像を基準として得られた視差推定結果をもとにそれぞれ中間視点画像を生成し，最後に両者を統合して最終的な中間視点画像を得る．

以下に各手順の詳細について述べる．

2.2.1　初期視差推定

あらかじめ用意した複数のブロックサイズによって計算された推定値を，式（2.1）の推定値の信頼性表価値 J_{cnf} をもとに統合，選択して初期視差を得る [91].

$$J_{cnf} = \frac{|SSD/S - 2\sigma_n^2|}{\overline{f_x^2} + \overline{f_y^2}} \tag{2.1}$$

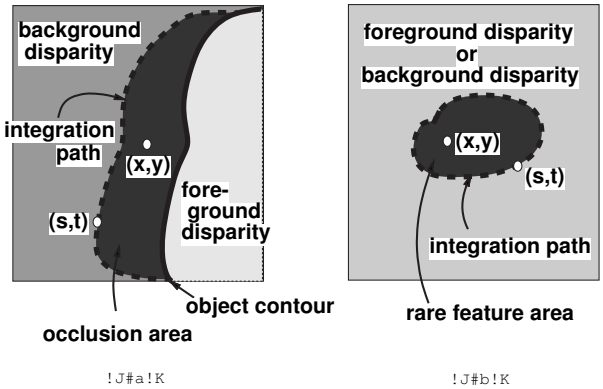


図 2.4: 前景/背景視差領域と接する未対応領域

式（2.1）において，SSD は残差平方和（Sum of Squared Differences），S はブロック内の画素数，σ_n は画像のノイズレベル，$\overline{f_x^2}$, $\overline{f_y^2}$ はそれぞれブロック内の水平垂直方向の平均 2 乗輝度勾配であり，式（2.1）は値が小さいほど対応づけの信頼性が高いことを示す．また，式（2.1）の分母は輝度勾配による影響を正規化するための項である．式（2.1）による評価値はブロックサイズに依存しない．したがって，異なるブロックサイズによる推定値の統合は，評価値が小さいブロックサイズによる推定値を選択することにより，適応的に精度が良いと考えられる推定値を得る．なお，輝度勾配が 0 に近い領域では，式（2.1）の値が不安定になるので，信頼性の評価はせず，初期視差に信頼性がないとする．

図 2.3 は，図 2.2 に示す画像に対して複数のブロックサイズ（10×10, 20×10, 40×40 画素）により縦横 10 画素間隔で計算した視差を統合して得た初期視差である．上記統合により，視差の変化する前景と背景との境界付近では小さなブロックサイズによって計算された視差が選択され，視差が一様な領域では大きなブロックサイズにより計算された視差が選択される．図 2.3 において，明るい領域ほど視差が大きいことを示しており，黒の領域は輝度勾配が閾値以下もしくは，式（2.1）に示した対応づけ時の信頼性評価値が閾値以上で対応づけができなかった領域を示す．この初期視差では，オクルージョンによって視差が原理上正しく計算できない領域が物体輪郭線付近に存在する．

2.2.2　未対応領域での視差推定

ブロックマッチングによって得られる初期視差においては，オクルージョンや輝度勾配が低いことが原因となり，図 2.4 に示すように視差地図上で視差が

求められない領域（未対応領域）が生じる．未対応領域は，以下の 3 つの条件のいずれかに該当する領域として抽出する．

1. ブロック内の平均 2 乗輝度勾配が閾値以下の場合．
2. 対応付けの信頼性評価値 J_{cnf} が閾値以上の場合．
3. 左右の画像をそれぞれ基準として計算した視差の差異を示す式（2.2）の値が，閾値以上の場合．

$$J_{dsp} = \begin{cases} (d_l(x_l, y_l) \ + \ d_r(x_l + d_l(x_l, y_l), y_l))^2 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad \text{（左画像基準の式）} \\ (d_r(x_r, y_r) + d_l(x_r + d_r(x_r, y_r), y_r))^2 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad \text{（右画像基準の式）} \end{cases} \tag{2.2}$$

ここで，(x_l, y_l), (x_r, y_r) はそれぞれ左右の画像中の画素の座標値，d_l,d_r は左右の画像を基準とした視差である．

上記の条件により，第 1 の条件から特徴のない領域（図 2.4（b）に黒で示す領域），第 2 の条件からオクルージョンにより対応点がない領域（図 2.4（a）に黒で示す領域），第 3 の条件から左右の画像間で 1 対 1 の対応がとれていない領域（図 2.4（a）（b）に黒で示す領域および繰り返しパターンのある領域）がそれぞれ抽出される．

中間視点画像生成時に物体輪郭付近の画像を生成するためには，上記の未対応領域での視差を，周囲の視差から推定する必要がある．

視差は物体輪郭線近傍で不連続に変化すると仮定する．そして，まず物体の輪郭を輝度エッジおよび色エッジの情報から抽出する．未対応領域は，周囲の領域との境界と（もし物体輪郭線が抽出されていれば）物体輪郭線とで囲まれる．

次に，未対応領域内の点において，物体輪郭線以外の境界だけに対して，式（2.3）に示す線積分を行い，領域内の各点 (x, y) における視差 $d(x, y)$ を周囲の視差 $d(s, t)$ によって決定する．

$$d(x, y) = w(x, y) \oint_{C_1} \frac{d(s, t)}{(s - x)^2 + (t - y)^2} d\mathbf{v} \tag{2.3}$$

ここで，(s, t) は領域境界上の微小線要素 $d\mathbf{v}$ の座標値，線積分区間 C_1 は図 2.4 に破線で示す境界，すなわち，物体輪郭線を除いた領域境界である．また w は

$$w(x, y) = 1 / \oint_{C_1} \frac{d\mathbf{v}}{(s - x)^2 + (t - y)^2} \tag{2.4}$$

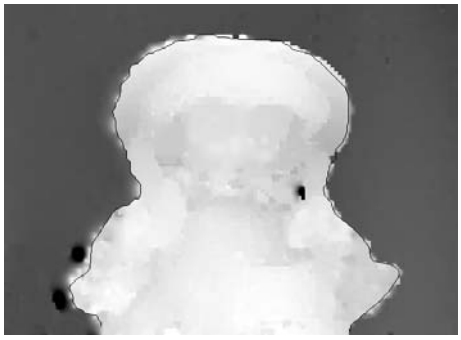


図 2.5: 視差の不連続を保持した視差推定結果

として定義される係数であり，推定時に参照する周囲の視差の重みの和を 1 にする．式（2.3）による推定により，領域内の点における視差は，境界からの距離に応じて境界上での視差の影響を受け，領域内では滑らかに変化し，さらに，物体輪郭線で接する他の領域との不連続性を保存する．

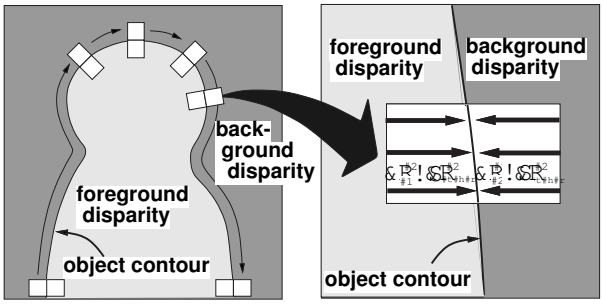
今回，前景の輪郭を得るために画像の輝度，色成分の勾配を考慮した動的輪郭モデル（Snakes）を用いた [92–95]．式（2.5）は Snakes に対して定義したエネルギー式である．

$$\oint_{C_2} \lambda\{(\nabla \mathbf{v})^2 + (\nabla^2 \mathbf{v})^2\} - (\nabla^2 f)^2 d\mathbf{v} \tag{2.5}$$

ここで，$\mathbf{v}$ は輪郭線，f は輝度成分，色成分を含む画素値，λ は輪郭の滑らかさを調節するパラメータである．積分路 C_2 は初期輪郭もしくは計算過程における輪郭位置である．Snakes による輪郭抽出は，式（2.5）を最小とする輪郭の位置を収束計算によって更新し決定する．図 2.5 は初期視差における未対応領域での視差推定後の視差分布を示す．図 2.5 中の黒線は Snakes によって求めた人形の輪郭である．図 2.5 と図 2.3 の初期視差の比較から，未対応領域での視差推定処理により，ブロックマッチングで視差が求められていなかった領域において，視差が周辺の視差から滑らかに推定されていることがわかる．

2.2.3　物体輪郭線近傍での視差推定

前節で述べた未対応領域での視差推定により，初期視差推定時に視差が求められなかった領域における視差を決定することができる．しかし，図 2.5 において，前景や背景の視差が物体輪郭線を越えて分布しているところでは，前景と背景の視差が滑らかに変化している．これは，ブロックマッチングでは輝度差を最小化して視差を決定するためコントラストの高い領域での視差が近傍の



!J#a!K !J#b!K

図 2.6: 物体輪郭線近傍における視差推定方法

コントラストの低い領域に伝搬する．そのため，初期視差推定時に，ブロックが物体輪郭線をまたいでいると，前景背景間で低コントラスト側に視差が伝搬するからである．

このブロックマッチングに起因する物体輪郭線近傍での誤推定を回避するために，図 2.6（a）に示すように，物体輪郭線に沿って視差を再度推定する．前節で述べた未対応領域での推定は，物体輪郭線以外のところで視差を滑らかに補間する．したがって，物体輪郭線に沿って設けた矩形領域内での視差の分布に関して，以下の性質を仮定する．

- 視差地図上での前景視差と背景視差の境界が物体輪郭線と一致していれば，図 2.6（b）に示す矩形領域を物体輪郭線で分割したそれぞれの領域内での視差の分散 σ_1^2, σ_2^2 は小さくなる．

- 逆に，視差分布の境界が物体輪郭線と一致せず，前景と背景間で視差が滑らかに変化していれば，矩形領域を分割した領域内での視差の分散 σ_1^2, σ_2^2 は大きくなる．

そして，一定の閾値 σ_{thr}^2 を設定し，$\sigma^2 > \sigma_{thr}^2$ となる場合には，図 2.6（b）中に矢印で示す方向に，領域内で物体輪郭線から離れた方向での視差を用いて領域内の視差を決定する．

図 2.7 は，上記手法により図 2.5 の視差について物体輪郭線近傍の視差を推定した結果である．図 2.5 と図 2.7 の比較から，物体輪郭線近傍の視差推定により，物体輪郭線を境界にして異なる視差が推定できていることがわかる．ただし，輪郭線の形状が複雑なところ（図 2.7 中 A の人形の右首筋と B,C の両手もと付近）では，前景背景間で視差の伝搬が生じている．これは，物体輪郭線に沿って矩形領域を設定して輪郭線近傍の視差を推定しているためである．複雑な形状の物体輪郭線に対する視差推定は本手法の課題のひとつである．

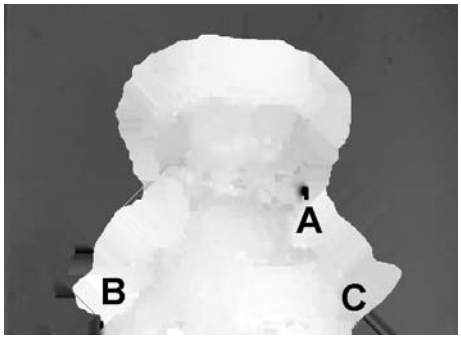


図 2.7: 物体輪郭線情報を用いた視差推定結果

2.2.4　中間視点画像生成

前節までに述べた処理を，左右の画像をそれぞれ基準として行い，得られた視差と左右それぞれの画像をもとに

$$I_{intmdt}(x + \alpha\, d(x, y), y) = I_{base}(x, y) \tag{2.6}$$

として，左右それぞれの画像を基準とした中間視点画像を得る．ここで，$I_{base}()$, $I_{intmdt}()$ は，基準画像および中間視点画像の画素値であり，$d()$ は $I_{base}()$ を基準画像とする視差である．また，α は視差に対する係数であり，左右の画像についての係数をそれぞれ α_l, α_r とすると，$0 < \alpha_l, \alpha_r < 1$ かつ $\alpha_l + \alpha_r = 1$ の条件下で両者を変化させることにより，ステレオ画像の任意の中間視点画像を得る．式（2.6）により生成した中間視点画像では，図 2.1 の（4）に模式的にグレイ部分として示すように，前景と背景間での視差の不連続に起因して，中間視点画像が生成されない領域が発生する．この領域は，左右それぞれの基準画像によって，前景に対して半対側に発生するため，左右双方の画像を基準とした中間視点画像を統合することにより，画面全体の画素に対して中間視点画像を生成できる．中間視点画像の統合は，各画素について片方でのみ中間視点画像が生成されている場合にはそのデータをそのまま使用し，両方で中間視点画像が生成されている場合には，両者の平均をとった．

図 2.8，図 2.9 にそれぞれ，ブロックマッチングによる初期視差を用いて生成した中間視点画像と提案手法による中間視点画像の前景を示す．図 2.8 はブロックマッチングにより，視差エッジ近傍での視差が正しく推定されていないため，生成された中間視点画像の前景の輪郭が乱れている．一方，提案手法では，視差の境界が精度良く推定され，中間視点画像での前景の輪郭がほぼ正しく再現されている．図 2.10 は，提案手法により左右の画像から生成した中間視点画像である．

図 2.8: 初期視差を用いて生成した中間視点画像の前景（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$）

図 2.9: 提案手法による視差より生成した中間視点画像の前景（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$）

図 2.10: 提案手法による視差より生成した中間視点画像（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$）

次に，定量的な評価のため，ブロックマッチングおよび提案手法により生成した中間視点画像と，これに該当するカメラ位置での実写画像との輝度差を比較した．輝度差の比較は，中間視点で実際に撮影した画像と生成画像の輝度差を誤差とし，誤差の分散 σ^2_{error}，平均 2 乗誤差 MSE（Mean Square Error）と式（2.7）に示す PSNR（Peak Signal Noise Ratio）値を計算した．計算結果を表 2.1 に示す．ただし，ブロックマッチングによる初期視差を用いて生成した中間視点画像では，人形の輪郭付近に画像が生成されない領域が生じるため，輝度差の計算は初期視差を用いた際に画像が生成される画素についてのみ計算している．

$$PSNR = 10\log_{10}\frac{255^2}{MSE} \tag{2.7}$$

表 2.1 において，提案手法による中間視点画像の誤差の分散と MSE の値は，ブロックマッチングにより生成した中間視点画像のものと比較して 1/3 程度となっている．また，PSNR 値で 4.5dB 改善されており，提案手法により中間視点画像の精度が向上していることが判る．

表 2.1: 中間視点画像の推定誤差および PSNR 値

	σ^2_{error}	MSE	PSNR [dB]
Block Matching	58.0	59.6	30.4
Proposed Method	18.8	21.0	34.9

2.3　輝度エッジと初期視差からの視差エッジの自動推定

前節では，動的輪郭モデル（Snakes）によって抽出した物体輪郭線に沿って矩形領域を設定し，矩形領域を物体輪郭線で分割した領域での視差の分散が小さくなるように（すなわち，物体輪郭線において視差が不連続に変化するように）視差を決定する方法を提案した．また，得られた視差を用いることにより，中間視点画像の画質が改善できることを確認した．しかし，この方法では以下の点が問題として残った．

- Snakes の初期輪郭の決定の自動化.
- 複数の輪郭への対応.
  （通常の Snakes では抽出する輪郭は 1 つ）
- 複雑な形状の輪郭への対応.
  （矩形領域の大きさで扱える輪郭形状の複雑さが決まる）

本節ではこれらの問題を解決するため，人が初期輪郭を与えずに物体輪郭線を検出し，任意の形状の複数の輪郭線について，輪郭線での視差の不連続な変化（すなわち視差エッジ）を推定できる視差推定方法を提案する [96].

提案手法では，初期視差推定時の信頼性の低い領域のみにおいて，輝度と色とについて方向別，解像度別のフィルタ出力を統合して物体輪郭線の強度を検出する．ここで，検出される物体輪郭線には部分的なとぎれや，誤検出により孤立したものが含まれるが，物体輪郭線の強度を用いて定義した視差分布のエネルギー場を最小化する視差推定により，物体輪郭線の強度が強くかつ空間的に連続しているところで視差は不連続となり，部分的なとぎれや，孤立した検出結果の影響を抑制することができる．

提案手法では，以下の条件が成り立つと仮定している．

- 奥行きが不連続に変化するところは，対応付けの信頼性評価値から初期視差推定時に信頼性が低い領域として検出できる.

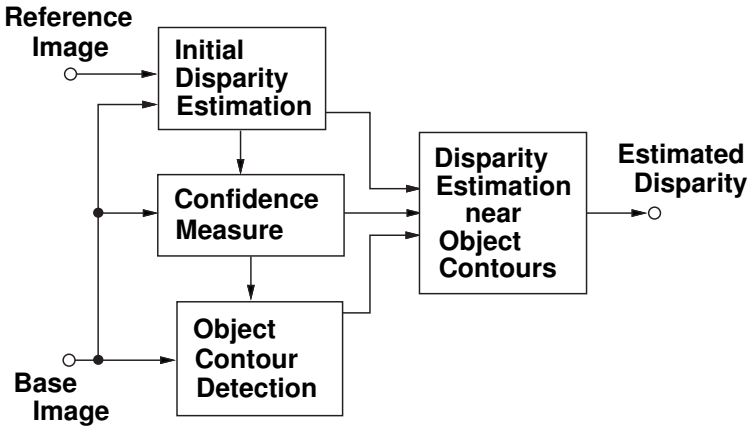


図 2.11: 視差エッジ自動検出処理のブロック図

図 2.12: 初期視差推定時に対応付けの信頼性が低い領域（2 値化の閾値：1.0）

- 奥行きが不連続に変化するところでは，輝度もしくは色が変化している．
- 初期視差推定時に対応付けの信頼性の低い領域では，物体の輪郭線だけが連続した強いエッジになっている．

シミュレーションにより，物体輪郭線で視差が不連続となる様に視差を推定できることと，見た目に自然な中間視点画像を生成できることを確認する．

図 2.11 は，本章で検討する視差推定方法のブロック図である．以下に各部分の処理手順について説明する．

2.3.1 初期視差推定と初期視差の信頼性評価

初期視差は，ブロックマッチング（ブロックサイズ 20×20 画素，縦横 10 画素間隔で計算）により，探索範囲内で SSD が最小となる視差を推定値とした．

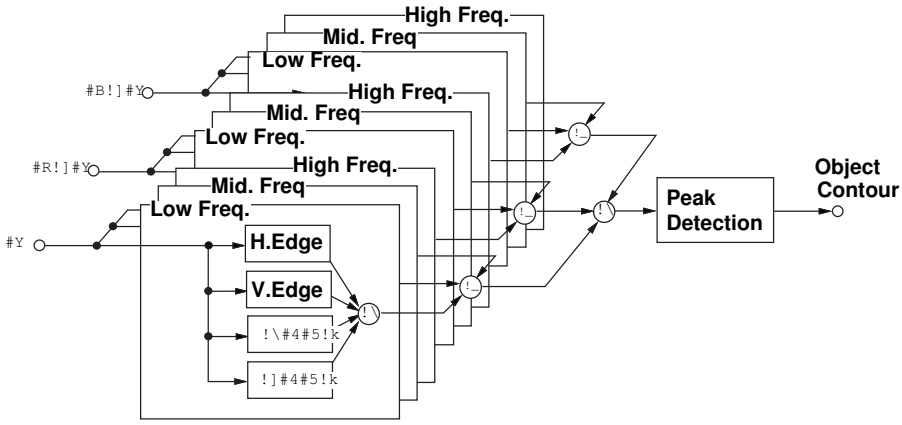


図 2.13: 物体輪郭線検出のブロック図

初期視差推定時の対応付けの信頼性評価には，2.2.1 節の式（2.1）を用いる．図 2.12 は，図 2.2 の人形の絵に対する初期視差推定の信頼性評価値を 2 値化し，信頼性の低い領域を抽出した結果である．図 2.12 から，奥行きが不連続に変化する人形の輪郭部分，オクルージョン（人形の左側），輝度勾配の少ない領域（人形の顔，袖）で，初期視差推定時の信頼性が低くなっていることがわかる．

2.3.2　物体輪郭線の自動検出

対応付けの信頼性が低い領域で，方向別のエッジを解像度毎，輝度，色成分毎に検出した結果を統合し，物体輪郭線を検出する．処理内容のブロック図を図 2.13 に示す．各部の処理と統合手順について以下に説明する．

（1）初期視差推定時の信頼性評価値 J_{cnf} が閾値以上の領域において，基準画像に対して方向別フィルタ [97]（水平，垂直，±45°）出力の 2 乗を加算．

$$G_{\mathrm{n}}(x,y) * I(x,y) = \frac{\partial G(x,y)}{\partial \mathrm{n}} * I(x,y) = \mathrm{n} \cdot \nabla G(x,y) * I(x,y) \quad (2.8)$$

ここで，$*$ はコンボリューション (積和) 演算記号，$I(x,y)$ は画像 (輝度もしくは色) の強度分布，n は微分方向を示すベクトル，$G\,(x,y)$ は微分方向とその垂直方向で異方性を持つガウシアンフィルタであり，

$$G\,(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_d\sigma_\perp} \exp\left(-\frac{(x\cos\theta + y\sin\theta)^2}{2\sigma_d^2}\right) \exp\left(-\frac{(-x\sin\theta + y\cos\theta)^2}{2\sigma_\perp^2}\right) \quad (2.9)$$

図 2.14: 検出された物体輪郭線（σ_d: 低域 3.0，中域 1.5，高域 0.75，$\sigma_\perp$: 6.0）

である．ここで，σ_d は微分方向についてのガウシアンフィルタの σ，$\sigma_\perp$ は微分方向と垂直な方向についてのガウシアンフィルタの σ である．

（2）空間周波数特性の異なる（低域，中域，高域）方向別フィルタについて（1）を演算し，3 つの空間周波数領域の演算結果を画素毎に積算．

（3）輝度 Y，色差 $R-Y, B-Y$ に対して（1）（2）の処理をし，結果を加算．

（4）（3）の結果に対して，稜線（水平もしくは垂直方向に走査したときの極大値）を検出し，稜線上の強度のみを抽出（他は強度 0 として出力）．

図 2.14 は，図 2.2 の左画像と初期視差の信頼性評価値から，上記の手順による物体輪郭線の検出結果を示す．人形左側のオクルージョンにおいて物体輪郭線以外のエッジが物体輪郭線として抽出されたり，部分的に人形の輪郭が検出されていない所があるが，後述する視差推定によりそれらの影響は抑制される．

2.3.3 物体輪郭線付近での視差推定

J_{cnf} が閾値以上の領域において，視差分布についてのエネルギー式

$$E = \frac{1}{2}\int_A w(x,y)\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2\right) dA \tag{2.10}$$

を定義する [98]．ここで，積分領域 A は J が閾値以上の領域を示す．また，$w(x,y)$ は $w(x,y) = 1/(\lambda + \text{物体輪郭線強度})$ として定義される重み付け関数であり，λ は視差の変化に対する滑らかさのパラメータである．視差 u の分布を式（2.10）を最小にするように決定することにより，物体輪郭線において視差が不連続に変化する視差を推定する．

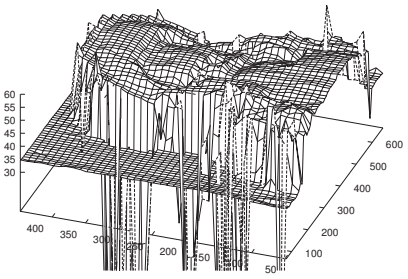


図 2.15: 初期視差

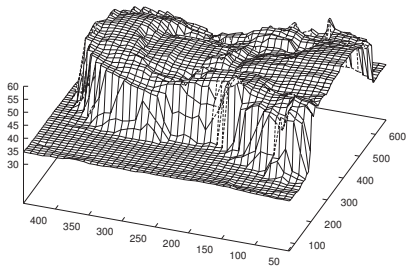


図 2.16: 提案手法による視差推定結果

式（2.10）を最小にする視差分布の条件は，$\delta E = 0$ より，

$$\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \tag{2.11}$$

となる．式（2.11）を画像データについて数値的に解く際には，莫大な未知数の連立方程式を解く必要がある [99]．今回は，

- 処理領域を初期視差の信頼性が低い領域に限定.
- 数値計算に用いる要素の節点位置を画素位置と一致させ，節点番号を画像走査順につけていくと，番号の近い変数により各要素についての方程式が表される．その結果，解くべき連立方程式の係数行列は対角成分付近以外で 0 となり，0 でない係数の行番号, 列番号, 係数値のみを記憶すればメモリーの節約が可能.

という条件から，有限要素法を用いて式（2.11）を解いた.

提案手法では，金出らの方法 [55] や Fua の方法 [88] と比較して，視差の再計算を画像全体についてではなく初期視差の信頼性が低い領域に限定している点と，収束計算をせずに視差を推定している点で，解の収束に関する問題の回避と演算量の低減を図っている.

2.3.4　視差推定結果

初期視差と提案手法による視差推定結果の鳥瞰図を図 2.15，図 2.16 に示す．両者の比較から，提案手法により物体輪郭線を境界として不連続に変化する視差分布を推定できることがわかる．また，提案手法により人形左側のオクルー

ジョン（初期視差が計算できていない領域）での視差が，背景視差とほぼ等しくなっていることがわかる．ただし，図 2.16 において，人形の左側の輪郭付近では誤検出された物体輪郭線の影響で，視差が部分的に前景と背景の中間の値となっている．

本章の提案手法を用いた中間視点画像については，次章において述べる．

2.4 中間視点画像の定量評価

前節までに述べた Snakes により輪郭を決定する方法と物体輪郭線の自動検出（Automatic Contour Detection : ACD）による方法の視差推定結果を用いた中間視点画像について，実写画像（人形の絵と Flower garden）に対する予測誤差を評価する．

図 2.17 に，実際に中央視点（$\alpha_l = \alpha_r = 0.5$）で撮影した人形の画像を示す．中間視点画像の定量評価は，中央視点について生成した中間視点画像と実写画像との輝度差を予測誤差とし式（2.7）の PSNR 値を計算する．PSNR 値は，図 2.17 に白枠で示す 3 つの領域，人形の顔（Face），人形の右側輪郭部（Contour），画面全体（Whole Image）で計算した．中間視点画像生成時の画素の移動量（式（2.6）における $\alpha\, d(x, y)$）のサブピクセル精度に対する PSNR 値を，図 2.18，図 2.19 に示す．図から，予測誤差の小さい人形の顔の領域で 39dB から 40dB，予測誤差を小さくするのが困難な輪郭付近で 28dB から 32dB 弱，画面全体としては 29dB から 32dB の PSNR 値となっている．

次に，動画像シーケンスのフラワーガーデンの第 0 フレームと第 5 フレーム間で視差（水平視差，垂直視差の双方）を推定し，中間視点画像として同シーケンスの第 2 フレーム画像を生成し，実写画像と生成した画像の輝度残差を予測誤差として計算した．図 2.20 はフラワーガーデンの第 2 フレームである．図中の白枠は PSNR 値を評価した範囲を示す．PSNR 値は，予測誤差の小さな背景の空の領域（Sky），予測誤差の最も大きくなる前景の木の輪郭付近（Wood），画像全体（Whole Image）の 3 つの範囲で評価した．図 2.21，図 2.22 は，画像生成時の画素移動量のサブピクセル精度を変化させて生成した第 2 フレームの予測画像の PSNR 値を示すグラフである．予測画像の PSNR 値は，背景の空の領域で 34dB から 37dB，前景の木の輪郭付近で 20dB から 21dB，画像全体で 23dB から 25dB の画質となっている．

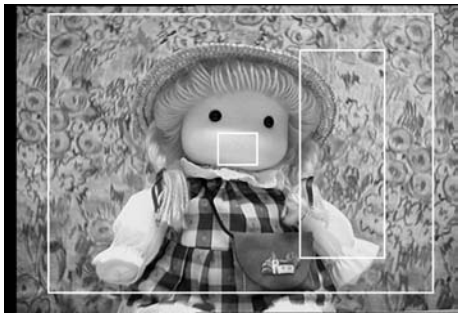


図 2.17: 中央視点での実写画像（白枠は誤差を評価した領域を示す.）

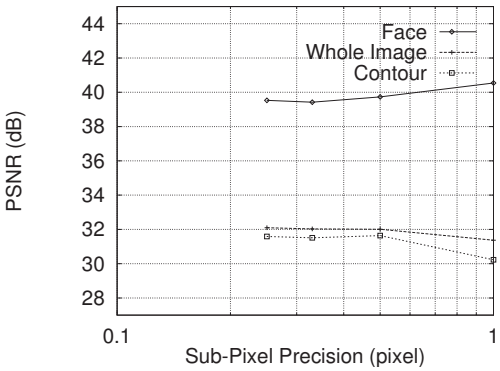


図 2.18: 中間視点画像生成時の画素移動量のサブピクセル精度に対する PSNR 値（Snakes による輪郭を用いた結果）

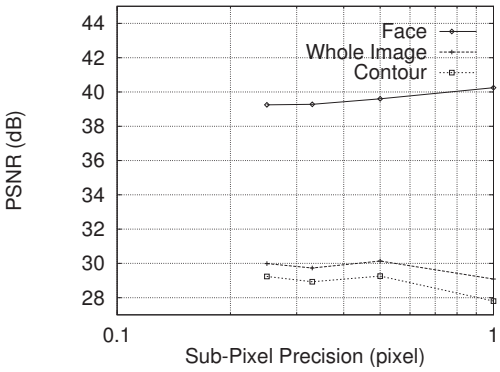


図 2.19: 中間視点画像生成時の画素移動量のサブピクセル精度に対する PSNR 値（ACD による輪郭を用いた結果）

図 2.20: フラワーガーデンの第 2 フレーム

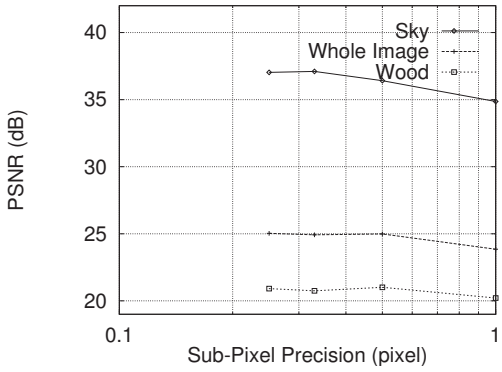


図 2.21: 画素移動量のサブピクセル精度に対する中間視点画像の PSNR 値（Snakes を用いた結果）

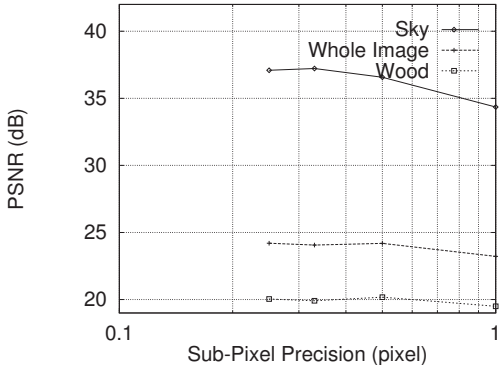


図 2.22: 画素移動量のサブピクセル精度に対する中間視点画像の PSNR 値（ACD による輪郭を用いた結果）

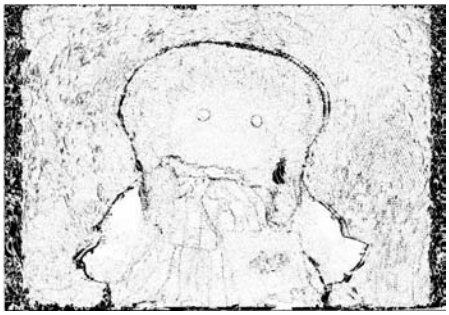


図 2.23: 中間視点画像の予測誤差（$\alpha\, d(x, y)$ の精度 1/4 画素）

以上の結果から，移動量のサブピクセル精度を上げることにより，画質が改善されていることが判る．なお，人形の画像の顔の部分については，上記サブピクセル精度を上げると PSNR 値が減少し画質が低下する結果となっている．その理由としては，顔の領域では輝度こう配が小さく特徴がないため，視差推定値に誤差が含まれる．その結果，予測誤差は少ないが画素移動量のサブピクセル精度を上げても PSNR 値が改善されないという現象が生じると考えられる．

また，2 つの視差推定方法を用いて生成した中間視点画像の画質を比較すると，Snakes を用いた方法の方が予測性能が良くなっており，その差は人形の絵については PSNR 値で 2dB 程度，フラワーガーデンについては 1dB 程度である．この理由としては，Snakes を用いた方法では物体輪郭線が必ず連続して検出され，そして，検出された物体輪郭線において視差推定値が不連続になるのに対し，ACD を用いた方法では検出される物体輪郭線が一部欠落したり，物体輪郭線以外にオクルージョン内のエッジが誤検出されたり，また，物体輪郭線の強度が小さく検出されたりする場合に，物体輪郭線付近での視差が滑らかに推定されるため，中間視点画像の輪郭付近での画質に差が生じると考えられる．

図 2.23 に，上記サブピクセル精度を 1/4 画素とした時の実写画像に対する中間視点画像の輝度誤差（2 乗誤差）を示す．図から，人形の輪郭付近で輝度誤差が大きいことがわかる．その原因は，輪郭付近において視差と輝度の双方が変化するためである．

2.5　まとめ

ステレオ画像から合成した中間視点画像で，見た目に自然な物体の輪郭を再現するための 2 つの視差推定方法を提案した．

- 中間視点画像の生成時に，視差がブロック内で不連続な領域において，動的輪郭モデルを用いて物体輪郭線の位置を輝度エッジおよび色エッジにより決定し，オクルージョン領域や輝度勾配が小さくて視差推定が困難な領域での視差を，物体輪郭線での視差の不連続を保ちながら周囲の視差をもとに推定する方法．この方法による視差推定結果を用いて生成した中間視点画像は，前景の輪郭が違和感なく再現されており，中間視点画像の推定精度が向上していることを確認した．

- 任意形状かつ複数の視差エッジに対する視差推定のための，物体輪郭線に対応する輝度エッジ，色エッジの自動抽出方法と，検出した物体輪郭線の強度に応じて視差が変化する視差推定方法．提案方法では，輝度エッジと色エッジの方向別，解像度別の強度と初期視差推定時の対応付けの信頼性評価値から物体輪郭線を抽出し，その強度に応じて視差分布の滑らかさの拘束を緩めるエネルギーを定義し，物体輪郭線近傍の視差をこのエネルギーを最小化する視差の分布として決定する．この方法において，任意形状かつ複数の物体輪郭線で不連続に変化する視差（視差エッジ）を推定できることを確認した．

中間視点画像を生成するための 2 つの視差推定方法について，視差推定結果を用いて生成した中間視点画像を比較した．人形の絵とフラワーガーデンについて，Snakes を用いた方法が物体輪郭線の自動検出結果を用いた方法よりも実写画像との輝度差が少なく，PSNR 値で 1dB から 2dB 画質が優れていた．その理由としては，前者では物体輪郭線が必ず連続して検出され，そして，検出された物体輪郭線において視差推定値が不連続になるのに対し，後者では物体輪郭線の検出結果に欠落，誤検出のある場合や，強度が小さく検出される場合に，視差が滑らかに推定されるため，中間視点画像の輪郭付近での画質に差が生じると考えられる．

今後の課題としては，以下の 2 点が挙げられる．

- オクルージョン内の輝度エッジ，色エッジと物体輪郭線の分離による，物体輪郭線検出性能の改善

- 視差推定処理の高速化

これらについては，今後取り組んでいく予定である．

第3章

複数カメラを用いたマルチスリット光の時分割撮影による光切断法の高速化

3.1 まえがき

近年のインターネット利用者の急増や，ディジタル衛星放送の開始に伴い，ディジタル動画像が身近なものとなってきている．ディジタル動画像の伝送，蓄積においては，膨大な情報量を圧縮する技術が不可欠である．動画像圧縮符号化の次世代標準方式であるMPEG4 [32] では，動画像をオブジェクト階層化（部品化） [33] し符号化することが提案されている．画像の部品化により，伝送路の状態や，送受信者の意図を反映した情報量（画像の場合画質）の制御が可能となる．また，前景，背景のさし替えにより，多様な映像コンテンツを容易に作成できる．

自然画のオブジェクト階層化には，奥行き情報とテキスチャ情報を併用した領域分割が有効である．本章では，高速動作するレンジファインダの開発と，レンジファインダによる奥行き情報とテキスチャ情報を併用した領域分割の検討について述べる．

対象物に光を投射し，これをカメラで撮影するアクティブレンジファインダは有効な形状計測方法として種々のものが提案されている．従来のアクティブレンジファインダにおいては，高速な動作と計測点数（距離画像の空間解像度）が両立しないこと，三角測量の原理による方法では距離画像中にオクルージョンが生じること，専用の素子を用いる場合には，その開発が大がかりになり，多くのコストと労力を要することが課題である．これに対しわれわれは，数メートルの距離範囲での動物体を含む対象について，専用の素子を用いずに実時間 (ビデオレート：60 フィールド/秒) で動作可能で，画像からのオブジェクト切り出しの実用に供せる解像度のレンジファインダの方式を提案する [100].

提案方式は，複数のスリット光と複数の赤外カメラを用い，計測距離範囲を

限定して各スリット光の画像中での存在範囲を決定することにより，1 フィールドの画像からスリット光を識別し，ビデオレートで計測する．複数の赤外カメラによる計測結果を単一視点の距離画像に統合することにより，距離画像の空間解像度を高めるとともに，オクルージョンでの計測値の欠落を補う．今回，2m±50cm の被写体距離のビデオレートでの測定を目的として試作をした．3.2 では開発したマルチスリット方式レンジファインダのシステム構成について述べ，3.3 では距離計算方法の詳細について述べる．

また，マルチスリット方式レンジファインダによる計測値は，水平方向の計測点数が 60 点程度であり，それ以外の点（画素）においては距離が計測されない．画像の切り出しのためには，すべての画素における距離値を決定する必要がある．3.4 では，スリット光走査を複数フィールド周期で変化させることによる水平解像度の改善と，レンジファインダによって計測された距離データの補間について述べ，距離情報とテキスチャ情報の双方を用いて画像からオブジェクトを切り出す．

3.2　マルチスリット方式

マルチスリット方式では，複数のスリット光を同時に投影し，各スリット光を走査範囲が重ならない範囲で走査し，フィールド周期内で露光タイミングが異る複数のカメラで撮像し三次元座標値を計測することより，ビデオレートの計測における空間分解能を向上させる．図 3.1 に提案手法の構成を示す．以下に各構成要素の動作について説明する．

光源は近赤外波長（798.0nm）の光を発し，複数（2.3° 間隔で 15 本）のスリット光を被写体に投射する（15 本のうち 8 本を計測に利用.）．回転ミラーは，各スリット光の走査範囲が重ならない範囲でスリット光をフィールド周期で水平方向に走査する．次に，被写体に投射されたスリット光を，半値全幅 6nm の干渉フィルタを装着した複数（8 台）の赤外カメラ（水平視野角 20°）で撮影する．各赤外カメラの露光タイミングを，図 3.2 に示すようにずらす．スリット光は走査されているので，各赤外カメラで異る位置のスリット光が撮影される．8 本のスリット光を走査しながら，8 通りの露光タイミングで撮影することで，ビデオレートで水平方向に 54 点[1]の三次元座標を計測する．

各赤外カメラで撮影されるスリット光は，図 3.3 のようになる．スリット光

[1]光源からは 2.3° 間隔でスリット光が照射されている．理論的には，水平 20° のカメラ視野には 9 本のスリット光が入るはずだが、実際には、有効画素数やカメラと光源の位置関係等の影響のため，カメラ視野内のスリット光は 7 本から 8 本になっている．さらに，カメラ視野内に入るスリット光本数は，カメラの位置，姿勢，被写体（較正面）の位置によっても変わる．Z=1800mm，2000mm，2200mm に配置した較正面を用いてスリット光をキャリブレーションし，54 本のスリット光について有効なキャリブレーション結果を得た．

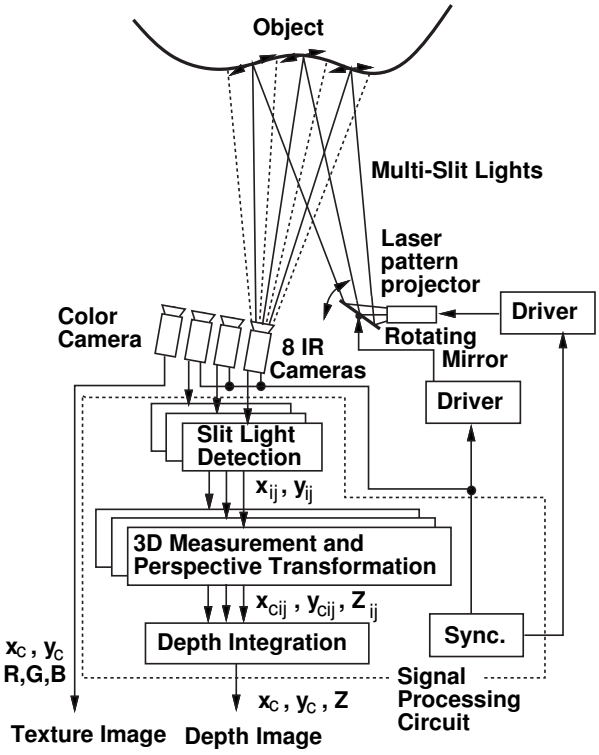


図 3.1: マルチスリット方式の構成

が検出された画素について，複数のスリット中のどのスリットによるものかを同定し，光源からの角度，カメラからの角度，光源とカメラのレンズ中心間の距離 (基線長) から，三角測量の原理によって三次元座標値を計測する．提案方式では，計測可能範囲を限定することにより，被写体に投射されたスリット光の画像中での存在位置を限定している．図 3.3 において，各スリット光の存在範囲は両側の点線の間に限定されている．各スリット光の存在範囲を限定することにより，スリット光の番号を同定する．

スリット光検出部は，上記スリット光番号を同定するために，各カメラで撮影された画像から被写体に投射されたスリット光を抽出する．

三次元座標値計算部では，スリット光が検出された画素について，三角測量により三次元座標値を計算する．

距離統合部では，空間解像度の改善された距離画像を得るために，各赤外カメラから得られた三次元座標値を視点変換し，ひとつの視点（カラーカメラの視点）についての距離画像として統合する．カラーカメラは，距離画像と同時にテキスチャ画像を得るためのものである．

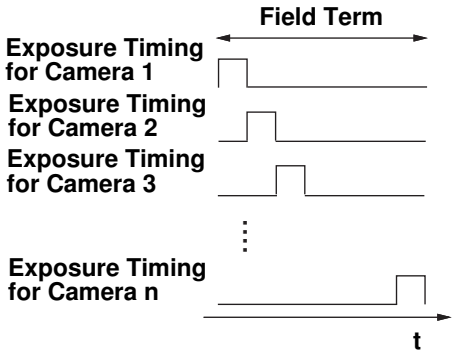


図 3.2: 各カメラの露光タイミング

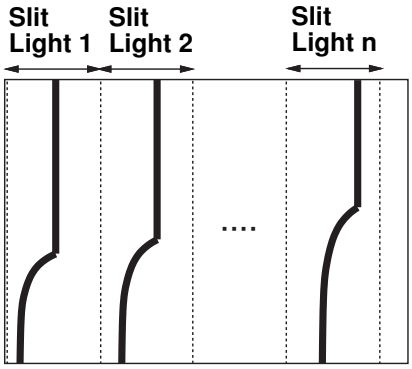


図 3.3: 各スリット光の存在範囲

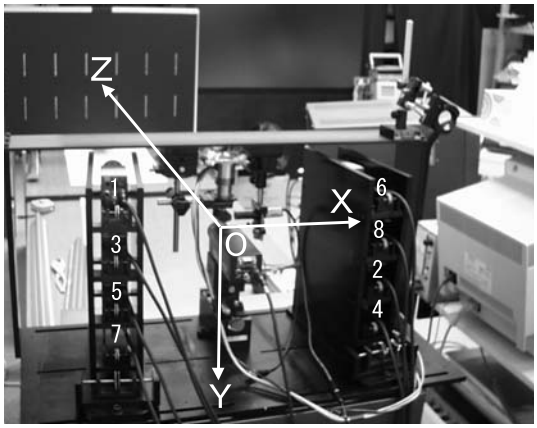


図 3.4: カメラ台の外観

提案方式により，水平 54 点，垂直 213 点[2] の距離画像をビデオレート（60 フィールド/秒）で計測できる．

今回，信号処理部をハードウェア化し，ビデオレートでの動作を実現した．表 3.1 に試作したレンジファインダの諸元を示し，図 3.4 に試作装置の外観を示す．装置は，カメラ，光源，ミラーを収めたカメラ台と，ホスト PC，信号処理部によって構成される．カラーカメラはカメラ台中央に配置され，その左右に赤外カメラを 4 台ずつ配置している．カラーカメラと赤外カメラの撮像素子寸法は，ともに 2/3 インチサイズ（8.8mm×6.6mm）であり，レンズも同じもの（焦点距離 25mm）を装着し画角（水平 20°，垂直 15°）を合わせている．

[2]今回用いた赤外カメラに外部同期をかけると，画像の上部でのみ水平同期がずれ，画像が水平方向に歪む現象が生じた．このため，1 フィールド 240 ラインのうち上部 27 ラインを計測対象から外している．

表 3.1: マルチスリット方式の諸元

Horizontal Resolution	54 points/field (noninterleaved) 108 points/field (interleaved) (with 2 fields cycle scanning) 216 points/field (interleaved) (with 4 fields cycle scanning)
Vertical Resolution	213 points/field
Field Rate	60 fields/sec
Relative Depth Precision	0.31% ∼ 0.36%
View Angle	20° (Horizontal) 15° (Vertical)
Laser Pattern Projector	
Lasiris Inc. Wavelength Laser Power Interbeam Angle	SNF–515L–780S–100–20°–2.3° 798.0 nm 75.07 mW (without structured light head) 2.3°
Rotating Mirror	
General Scanning Inc. Driver	M2T MiniSAX
IR Cameras	
Hamamatsu Photonics CCD Size	C5999 2/3” size 8.8mm×6.6mm
Color Camera	
Sony CCD Size	XC–711 2/3” size 8.8mm×6.6mm
C Mount Lens	
Hamamatsu Photonics F Focal Length	A3591 1.8 25mm
Optical Band Pass Filters	
Optical Coatings Japan $\Delta\lambda 1/2$ (FWHM)	DIF–A 6nm
Host PC	
OS	Miscrosoft Windows 95

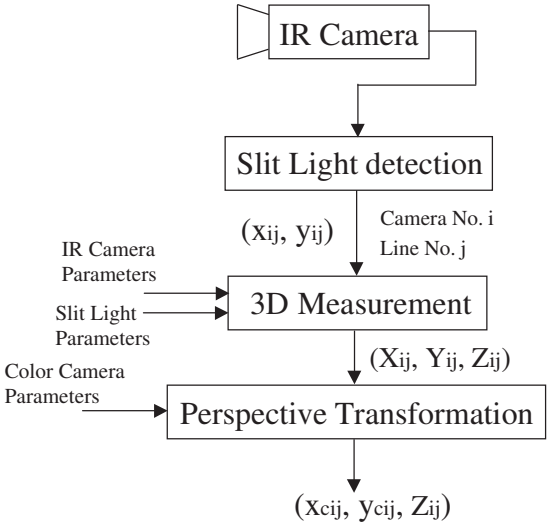


図 3.5: 距離計算の手順

図中，各赤外カメラの番号は時分割撮像の順番である．個々の赤外カメラの計測不能点（オクルージョン）が，統合後の距離画像中で分散するように，左右交互，上下 2 段違いのカメラ位置の順番で時分割撮像する．レーザ光源と回転ミラーは，統合後の距離画像におけるオクルージョン発生をなるべく少なくするために，カラーカメラ直上に配置している．ワールド座標系は，カラーカメラのレンズ中心を原点 O とし，水平に X 軸，鉛直下向きに Y 軸，カメラから被写体に向かって Z 軸をそれぞれとる右手座標系を用いる．また，図 3.4 左上の平板はカメラキャリブレーションに用いた被写体である．黒地に描かれた白線（長さ 10cm，水平間隔 14cm，垂直間隔 10cm）の端点を用いてキャリブレーションをした．

3.3　距離計測方法

図 3.5 にマルチスリット方式における距離測定の手順を示す．被写体に投射したスリット光は赤外カメラによって撮像される．スリット光を検出し，その位置（画素座標値）を，予め較正した赤外カメラパラメータ，スリット光パラメータを用い，三角測量の原理によって三次元座標値に変換する．計測した三次元座標値は，カラーカメラパラメータによりカラーカメラの視点に変換し，1 枚の距離画像に統合する．

3.3.1 キャリブレーション

提案方式で用いるカメラとスリット光それぞれについて，カメラの位置，姿勢とスリット光の方向を予め計測しておく必要がある．カメラとスリットを，最小二乗法によるパラメータフィッティングにより，キャリブレーションした [101].

カメラ キャリブレーション

撮像時の物体の見え方は，式 (3.1) の透視変換によりモデル化される．

$$\begin{pmatrix} hx \\ hy \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

各赤外カメラの画素座標値 (x, y) とワールド座標値 (X, Y, Z) が既知の点との対応を取る．今回のキャリブレーションでは，図3.4左上の平板を Z=1,800mm, 2,000mm, 2,200mm の位置に配置し，黒地に描かれた白線の端点について，画素座標値とワールド座標値の対応を取った．式 (3.1) は，両辺を等倍しても成り立つので，$C_{34} = 1$ とする．複数の点における画素座標値とワールド座標値の対応関係に対して，最小 2 乗当てはめによりカメラパラメータ C_{11}〜C_{34} を計算する．

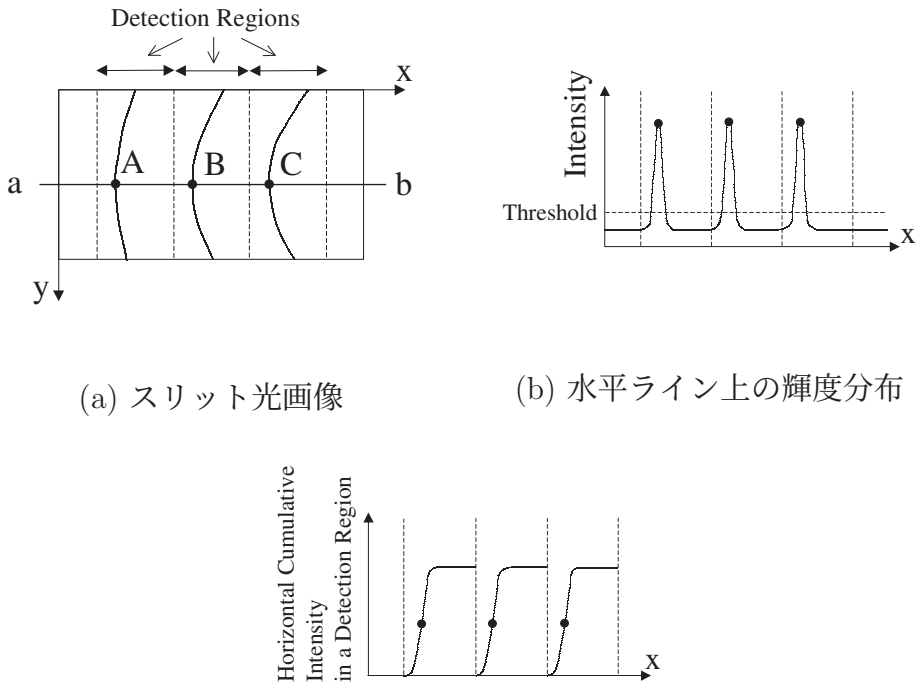
上記のカメラパラメータをカラーカメラについても計算する．ワールド座標系の原点をカラーカメラのレンズ中心に一致させるために，予め以下のセッティングをした．

レール上を平行移動するスクリーン（鉛直面）を作成し，スクリーン面と平行にワールド座標系の XY 面をとり、スクリーンから 2000mm 離れた位置にカラーカメラのレンズ中心（CCD から f 値＝ 25mm の位置）を配置する．そして，スクリーン面をワールド座標の Z 軸方向（レールと平行な方向）に動かした時に，カラーカメラの画像中心に写るスクリーン上の点が動かないようにカラーカメラの位置，姿勢を調整する．

スリット光キャリブレーション

以下の手順でスリット光をキャリブレーションする．

（1）距離 Z 既知の面にスリット光を照射し，これをカメラパラメータ既知の赤外カメラで撮像する．



(a) スリット光画像　(b) 水平ライン上の輝度分布

(c) 水平ライン上の累積輝度分布

図 3.6: スリット光位置の検出方法

（2）3.3.2 で述べる方法でスリット光を検出し同定する．

（3）スリット光の撮像位置 (x, y) を式 (3.1) に代入し，残りの 3 次元座標値 X, Y を計算する．

（4）検出された複数の 3 次元座標値に最小 2 乗法により面を当てはめ，各スリット光パラメータを決定する．

今回の面当てはめでは，光学系の歪が十分小さいことを確認できたためこれを無視し，レーザスリット光の軌跡を平面 $aX + bY + cZ + d = 0$ と考えてスリット光パラメータ a, b, c, d を決定した．

3.3.2　スリット光の検出と同定

各スリット光の存在範囲内の累積輝度を用いて，スリット光を検出する．図 3.6(a) における着目水平ライン ab 間での輝度分布は，レーザスリット光が空

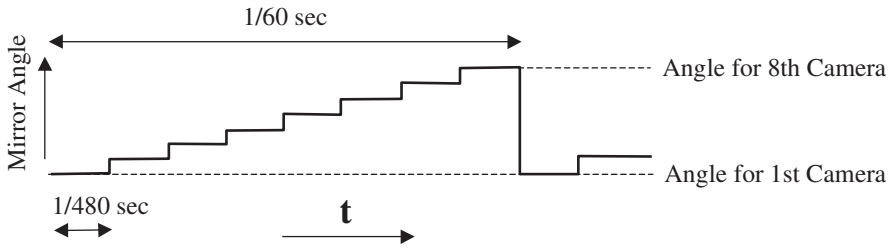


図 3.7: 回転ミラーのステップ駆動

表 3.2: 各スリット光の存在範囲の開始水平座標値

Camera	Slit Light No.							
No.	0	1	2	3	4	5	6	7
1	-111	-13	84	179	273	366	458	550
2	-99	-1	96	191	285	377	470	562
3	-87	12	108	203	296	389	481	574
4	-74	24	120	214	308	401	493	585
5	-50	42	135	227	320	413	507	603
6	-38	54	146	238	331	425	519	615
7	-27	65	158	250	343	436	531	627
8	-15	77	169	262	354	448	543	640

間的な広がりを持つため，図 3.6(b) のようになる．各スリット光位置 A，B，C は，理想的には輝度最大の画素として検出できる．しかし，実際には，ノイズの影響を受けて他の画素において輝度が最大になったり，また，輝度値が大きすぎる場合には，撮像時に白飛びを起こし，複数の画素が最大輝度をとることがある．

上記のような場合にも，スリット光の位置を安定して検出するために，まず，各スリット光についての存在範囲内でしきい値（8bit のデータに対して 16）[3] 以上の輝度について水平方向に累積輝度を計算する．そして，存在範囲内で累積輝度が存在範囲内の最大値（すなわち，存在範囲右端における累積輝度）の 1/2 を越える画素をスリット光の位置として検出する（図 3.6(c)）．上記のスリット光検出により，ノイズやスリット光の白飛びの影響を受けにくく，安定してスリット光位置を精度よく検出できる．また，レーザスリット光の空間的な広がりを抑えるために，回転ミラーをステップ状に駆動する．図 3.7 は，

[3] しきい値は、２次反射等の外乱の影響を小さくするように実験的に決定した．

回転ミラーの駆動と撮像タイミングの関係を示す．8 台の赤外カメラを用いる場合，撮像開始時間の間隔は 1/480 秒となる．赤外カメラの電荷蓄積期間は 1/500 秒に設定している．ミラーの動きによるスリット光のぶれが小さくなるようにカメラの同期を調整し，1/480 秒の撮像間隔のどのタイミングで 1/500 秒の電荷蓄積をするか決定している．

また，今回用いた回転ミラーは動作開始後 15 分程度の間、電圧角度特性がドリフトするため、予め 15 分から 30 分ミラーを動作させてから計測をしている．

各カメラについて検出したスリット光について，表 3.2 から番号を同定する．表 3.2 は，各カメラについて各番号のスリット光の存在範囲の最小値を示す．各スリット光の存在範囲は，該当の最小値から次のスリット光番号についての最小値未満の範囲である．表 3.2 の値は，Z=2000mm の面上におけるスリット光照射位置が存在範囲の中央になるように，実験により決定した．また，今回試作したハードウェアでは，画像を 640×480 の解像度でサンプリングするため，表中の値で 0 未満 640 以上のものは，カメラの視野から外れていることを示す．

3.3.3　三次元座標値の計算

3.3.1 節，3.3.1 節でのカメラキャリブレーションとスリット光キャリブレーションの結果から，式 (3.1) とスリット光が通過する平面 $aX+bY+cZ+d=0$ との連立方程式を解くことにより，三次元座標値 (X,Y,Z) を

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}-C_{31}x & C_{12}-C_{32}x & C_{13}-C_{33}x \\ C_{21}-C_{31}y & C_{21}-C_{32}y & C_{23}-C_{33}y \\ a & b & c \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x-C_{14} \\ y-C_{24} \\ -d \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

として得る．上記連立方程式の解は，スリット光パラメータ a,b,c,d によって決まる平面と，赤外カメラのカメラパラメータ C_{11}〜C_{34} および撮像位置 (x,y) によって決まる三次元空間中の直線との交点の座標値である．

3.3.4　視点変換による距離データの統合

複数の赤外カメラとスリット光の組合わせにより得た三次元座標値は，カラーカメラ視点の距離画像に視点変換して統合する．三次元座標値 (X,Y,Z) からカラーカメラの視点での画像 (x_c,y_c) へは，カラーカメラのカメラパラ

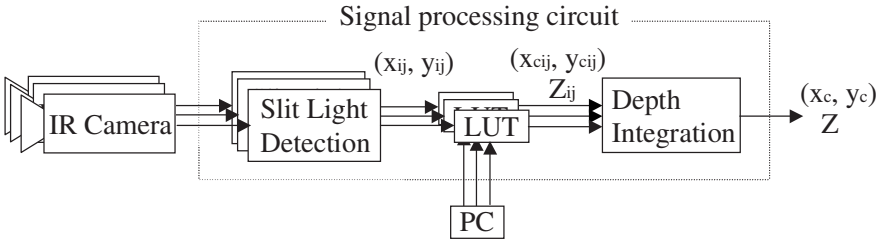


図 3.8: 信号処理部の構成

メータ C_{C11}〜C_{C34} を用いて，

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \frac{1}{h_c} \begin{pmatrix} C_{C11} & C_{C12} & C_{C13} & C_{C14} \\ C_{C21} & C_{C22} & C_{C23} & C_{C24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

として変換する．ここで，

$$h_c = C_{C31}X + C_{C32}Y + C_{C33}Z + C_{C34} \tag{3.4}$$

である．

3.3.5　LUT 参照による一括計算

前節までに述べた距離計算と視点変換の結果を予め全てのスリット光検出位置について計算し，LUT としてハードウェアのメモリに保持する．ハードウェアによる計測時には，スリット光の検出された画素座標値 (x, y) とカメラ番号 i から，LUT の参照によりビデオレートで視点変換後の画素座標値 (x_c, y_c) と距離 Z を得る．図 3.8 にハードウェア化した信号処理部の構成を示す．

3.3.6　計測可能範囲

本方式の計測可能範囲は，スリット光の存在範囲，基線長，基準距離，光源の光強度によって決まる．図 3.9 は，これらのシステム設計値の関係を示す．今回の試作では，基線長を 20cm，基準距離を 2m とした．スリット光の存在範囲は，図 3.9 に示すように，スリット光が基準距離において存在範囲の中央を通過するように設定する．計測可能範囲は，これらの値と表 3.2 から計算でき

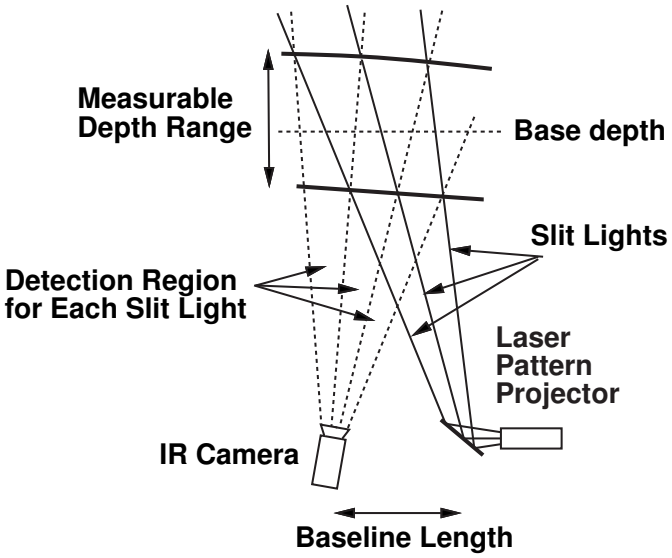


図 3.9: システム設定値と計測可能範囲

る．表 3.3 に試作機の計測可能範囲を示す．今回の設定では，8 台のカメラについて平均で 1,603mm から 2,696mm の範囲が計測可能である．また，表 3.3 中の “—” は，スリット光が赤外カメラの視野から外れたために，距離が測定されなかったことを示す．カメラ番号 5，6 以外の赤外カメラは，水平方向に 7 点の計測ができており，全体では水平方向に 54 点の計測が可能である．なお，レーザパワーによって決まる計測可能範囲は，1 スリット光あたり 5mW のレーザパワーで 4m まで，1 スリット光あたり 15mW のレーザパワーで 7m まで距離計測可能である（レーザ光撮像時の信号レベルとノイズ（標準偏差）の比 10:1 を計測限界とした場合）．

3.3.7　距離測定精度

図 3.10 は，Z =1,800mm, 2,000mm, 2,200mm の位置に配置したスクリーンについての距離計測結果である．表 3.4 は，1,800mm, 2,000mm, 2,200mm の距離に配置したスクリーンに，スリット光を投射して距離計測した結果である．表 3.4 において，$Z = 1,800$mm の時に誤差が大きくなっているが，これは，図 3.10 の A において，$Z = 1,800$mm の場合にのみカメラの視野に入るスリット光について，スリット光パラメータが正しく計算されていないためである．$Z = 1,800$mm については，図 3.10 の A のデータを除外した場合の値を括弧内に示す．これらの計測結果から，試作したレンジファインダの計測誤差

表 3.3: 各スリット光の計測可能範囲 (mm)

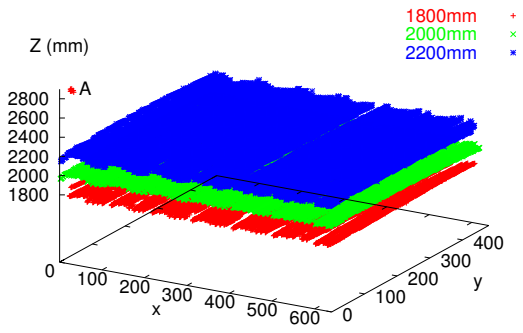
Camera No.	Slit light No.							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	—	1573	1590	1583	1576	1572	1563	1583
	—	2472	2649	2613	2563	2526	2508	2491
2	—	1535	1537	1533	1531	1518	1512	1597
	—	2600	2590	2556	2515	2495	2458	2446
3	—	1540	1537	1533	1521	1510	1496	1659
	—	2609	2594	2556	2528	2491	2471	2445
4	—	1547	1546	1533	1518	1507	1498	1722
	—	2578	2564	2551	2512	2483	2471	2435
5	—	1610	1625	1753	1652	1659	1659	—-
	—	2774	2819	2935	2941	3000	3055	—-
6	—	1626	1632	1644	1659	1671	1669	—
	—	2742	2787	2832	2897	2933	2966	—
7	1793	1608	1627	1640	1656	1663	1668	—
	2413	2804	2830	2875	2909	2954	2966	—
8	1713	1615	1629	1650	1628	1674	1679	—
	2863	2851	2893	2901	2946	2961	2967	—

は，被写体距離に対して 0.4%以下になっていることがわかる．

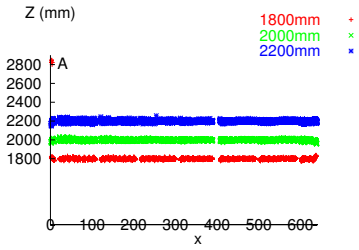
3.4 水平解像度の改善と距離計測値の補間

距離データを用いた切り出しのためには，距離データを画素毎に得る必要がある．しかし，マルチスリット方式によって得られる距離データは，水平 54 点であり，NTSC 信号の画像（標本化周波数 13.5MHz で水平有効画素数 720）と比較してかなり少ない．本章では，マルチスリット方式の水平解像度の改善と，距離画像中で距離が計測されなかった領域における距離値を，近傍画素で計測された距離データをもとに決定する方法について述べる．また，補間した距離データを用いて，画像からオブジェクトを切り出す[4]．

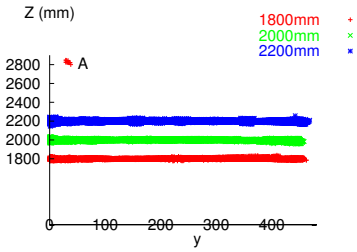
[4]システムとしては，距離データの水平方向の 0 次補間（次のデータが計測されるまで同一値をホールド）と補間した距離画像を用いたカラー画像の切り出しをハード化し，リアルタイム実装している．しかし，そのようにして補間した距離データを用いた切り出しでは，前景の輪郭が 1 ライン毎に乱れる．本章の補間，切り出し処理についてはシミュレーションにて検討した．



(a) 鳥瞰図



(b) xZ 面への投影図



(c) yZ 面への投影図

図 3.10: 距離データの統合結果

3.4.1　オクルージョン発生位置の拡散と水平解像度の改善

提案方式では，視点の異なる複数の赤外カメラ（1 列 4 台で 2 列のカメラアレイ）を用いて三角測量しているため，ひとつの赤外カメラによる計測でオクルージョンとなる点（スリット光が投影され，かつ，カラーカメラ視点では見えるが，上記赤外カメラ視点では見えない点.）が，他の赤外カメラにより計測できる可能性がある．2 列のカメラアレイのうち，被写体に向かって右側のカメラアレイによる計測では，距離画像中で被写体の左側背景にオクルージョンが生じるが，被写体の右側背景については計測が可能であり，一方，左側のカメラアレイについてはその逆となる．したがって，フィールド期間内にステップ状に掃引されるスリット光位置と，その位置でのスリット光を撮像し計測する赤外カメラの番号（すなわち各赤外カメラの撮像タイミング）との対応関係を変化させることにより，統合後の距離画像におけるオクルージョンの発生位置を拡散し，かつ，距離画像の解像度を改善することができる．今回の試作シ

表 3.4: 距離測定精度

Depth Z (mm)	Mean Error $\overline{\Delta Z}$ (mm)	Mean Square Error MSE (mm^2)	Standard Deviation σ (mm)	Relative Precision σ/Z (%)
1800	0.77 (0.17)	615.7 (31.0)	24.8 (5.7)	1.4 (0.31)
2000	-0.14	45.1	6.7	0.34
2200	0.20	64.0	8.0	0.36

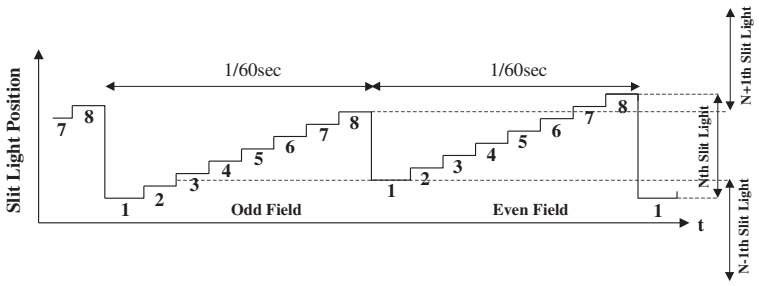


図 3.11: フィールド間で異なるスリット光走査

ステムでは，撮像タイミングをフィールド毎に動的に変更することができないため，スリット光の走査位置（回転ミラーの駆動信号波形）を複数フィールド周期で変化させることで，オクルージョンの拡散と距離画像の水平解像度改善を図る．

図 3.11 はスリット光の走査位置を 2 フィールド周期で変化させる場合の走査位置を示す．図 3.11 において，縦軸はスリット光の走査位置（統合後の距離画像における計測点の x 座標値に相当），横軸は時間，各ステップの数字はスリット光を撮像する赤外カメラの番号を示す．図 3.11 において，スリット光の走査位置はフィールド間で 1.5 ステップのオフセットがある．これにより，1 フレームの距離画像において，計測点の x 座標値がライン毎に異なり，水平解像度を改善できる．また，1 フレームの距離画像を合成する際に，第 1 フィールドと第 2 フィールドにおけるオクルージョンが隣接することを防ぐことができる．すなわち，図 3.11 において，Odd フィールドと Even フィールドにおける赤外カメラ 1（被写体に向かって右側のカメラアレイのカメラ）による計測点の間に，赤外カメラ 2（被写体に向かって左側のカメラアレイのカメラ）に

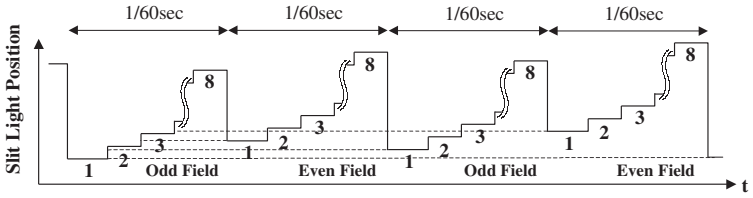


図 3.12: 4 フィールド周期のスリット光走査

よる計測点が挿入されることで，オクルージョンによる計測点の欠落が空間的に連続することを防ぐ．その結果，片側のカメラアレイによる計測でオクルージョンが生じた場合にも，オクルージョンが生じない場合の半分の解像度であるが計測点は確保できる．

以上述べた 2 フィールド周期のスリット光走査による水平解像度の改善は，回転ミラーの駆動信号波形と計測用 LUT の値の変更によりリアルタイム実装している．

また，図 3.11 の走査位置にさらにフレーム間で 0.75 ステップのオフセットを与え，図 3.12 に示す様に 4 フィールド周期でスリット光を走査した．図 3.12 において，スリット光の走査位置は最初のフィールドに対して，2 番目のフィールドで 1.5 ステップ，3 番目のフィールドで 0.75 ステップ，4 番目のフィールドで 2.25 ステップ，それぞれオフセットしている．前フレームと現フレームの 4 フィールド分の計測点を時間方向に蓄積することにより，2 フィールド周期のスリット光走査時の 2 倍の空間解像度を得る．

4 フィールド周期のスリット光走査による水平解像度の改善については，計測用 LUT の容量不足でリアルタイム実装できておらず，回転ミラーの駆動信号波形のみ変更し，処理はソフトウェア実装している．

図 3.14 は，図 3.13 の人形を 3 通りのスリット光走査によって計測した距離画像の中央部分である．図 3.14 の (a) はフィールド間で固定（走査位置のオフセットなし），(b) は 2 フィールド周期（走査位置のオフセット，0 ステップ，1.5 ステップ），(c) は 4 フィールド周期（走査位置のオフセット，0 ステップ，1.5 ステップ，0.75 ステップ，2.25 ステップ）のスリット光走査による計測結果である．図 3.14 中，黒点が距離値の計測された画素であり，点の濃さが濃い程手前であることを示す．人形の輪郭付近ではオクルージョンのために計測点の欠落が生じているが，視点の異なる 8 台の赤外カメラによる計測点を統合して距離画像を得ているため，オクルージョンが特定の領域（例えば，前景領域の左右いずれか）に生じることなく分散し, オクルージョンが生じない場合の半分の解像度となるが計測点は確保できている．また，図 3.14(a) と比べて，(b) は 2 倍，(c) は 4 倍の水平解像度になっている．

図 3.13: カラー画像（640×480 画素）

(a)　(b)　(c)

図 3.14: 距離画像

3.4.2　距離データの補間結果を用いたカラー画像の切り出し

距離データを用いた切り出しのために，距離データを補間し，全ての画素について距離値を決定する．補間値の補間は，距離が計測されていない画素（着目画素）における距離値を周囲の距離が計測されている画素（参照画素）における距離値の重み付け和により決定する．補間時の重みとして，次の 2 通りのものを用いた．

（1）着目画素と参照画素の画素座標値の差（画像空間中でのユークリッド距離）．

（2）着目画素と参照画素の画素座標値の差と，着目画素と参照画素の RGB 値

の差（RGB 色空間中でのユークリッド距離）.

両者の違いは，距離値の補間時にカラー画像の色情報を考慮するか否かという点である．補間計算は式（3.5）

$$d(x,y) = \frac{\displaystyle\sum_{s,t\in A} \frac{d(s,t)}{r_{xy}^2}}{\displaystyle\sum_{s,t\in A} \frac{1}{r_{xy}^2}} \tag{3.5}$$

もしくは式 (3.6)

$$d(x,y) = \frac{\displaystyle\sum_{s,t\in A} \frac{d(s,t)}{r_{xy}^2(r_{RGB}^2+\lambda)}}{\displaystyle\sum_{s,t\in A} \frac{1}{r_{xy}^2(r_{RGB}^2+\lambda)}} \tag{3.6}$$

によって行う．式 (3.5)，式 (3.6) において，A は着目画素 (x,y) の近傍領域である．A の大きさは，補間処理時に実際に計測された距離データが含まれるように決定した．1，2，4 フィールド周期のスリット光走査について，それぞれ，29×29，23×23，17×17 画素の窓領域としている．また，(s,t) は距離が計算されている画素の座標値，r_{xy} は，注目画素と参照画素間の画素座標値の違い（すなわち画像空間中でのユークリッド距離）

$$r_{xy} = \sqrt{(x-s)^2+(y-t)^2} \tag{3.7}$$

であり，r_{RGB} は，着目画素の画素値と参照画素の画素値との RGB 空間中のユークリッド距離

$$r_{RGB} = \sqrt{\left(R(x,y)-R(s,t)\right)^2+\left(G(x,y)-G(s,t)\right)^2+\left(B(x,y)-B(s,t)\right)^2} \tag{3.8}$$

である．また，λ は RGB 色空間中の距離が 0 の場合にも式（3.6）が不定にならないようにするための安定化項（定数）である．今回の検討では，RGB 各 8bit の値に対して λ=1 として計算した．λ=1 とすることにより，着目画素と参照画素間で RGB 値の差がない場合に，式（５）と式（６）は同一の式となる．式（3.6）は，距離値が r_{xy}^2 と $r_{RGB}^2+\lambda$ に反比例した影響を受けて決定されることを示す．また，見方を変えると式（3.6）は，色情報に基づいて重み付けされた画素間距離を用いた補間であると解釈できる．色情報に基づく重み付けの式としては一意に決まるものではなく，他の重み付けも考えられるが，ここでは，色の違いに応じて重みが変わるように実験的に式（3.6）を決定した。

(a) (b) (c)

図 3.15: RGB の情報を用いずに補間した距離データにより切り出した前景

表 3.5: 切り出し誤差の比較（RGB の情報を用いない補間）

		Scan Cycle of Slit Lights		
		1field	2fields	4fields
$\frac{ExtractionError}{ContourLength}$	mean	4.68	2.92	2.11
	σ	0.263	0.219	0.079

3.4.3 切り出し結果の比較

本節では水平解像度改善の効果を評価し，また，画像空間中での距離だけを考慮した距離データ補間と，RGB の色情報を併せて考慮した距離データ補間による切り出し結果について比較する．

図 3.15 は，RGB の情報を考慮せずに補間した距離値を用いて切り出した前景である．図中,（a）はフィールド間で一定のライン光走査,（b）は 2 フィールド周期のライン光走査,（c）は 4 フィールド周期のライン光走査による結果である．ライン光の走査をフィールド間で変化させることにより，切り出し精度が改善されていることがわかる．表 3.5 は，上記 3 通りのライン光走査について，被写体の人形を動かしながら撮影した連続 10 フレームに対する切り出し精度を比較したものである．表 3.5 では，手動による切り出しと差違が生じた画素数を切り出し誤差とし，切り出し誤差を前景物体の輪郭長で正規化した値（切り出し誤差の平均幅）についての平均値と標準偏差を示している．また，輪郭長は手動により切り出した前景領域について，4 近傍で背景画素と接する画素数としている．図 3.16，表 3.6 はそれぞれ，RGB の情報も考慮して

(a)　(b)　(c)

図 3.16: RGB の情報を用いて補間した距離データにより切り出した前景

表 3.6: 切り出し誤差の比較（RGB の情報を用いた補間）

		Scan Cycle of Slit Lights		
		1field	2fields	4fields
$\frac{ExtractionError}{ContourLength}$	mean	4.64	2.86	2.05
	σ	0.301	0.193	0.119

補間した距離値を用いて切り出した前景と，3 通りのライン光走査についての切り出し精度の比較結果である．表 3.5，表 3.6 の結果から，スリット光走査をフィールド間で固定のものから，フィールド間で変化する 2 フィールド周期のものにすることにより，切り出し誤差を約 2/3 にでき，スリット光走査を 4 フィールド周期にすることで，さらに切り出し誤差を約 2/3 にできている．また，RGB の情報を用いた距離画像の補間により，0.9%から 2.8%切り出し誤差が低減される．表 3.5，表 3.6 において，4 フィールド周期でのスリット光走査時の正規化した切り出し誤差は 2 画素程度であり，クロマキーを用いた場合の正規化切り出し誤差を 1 画素もしくはそれ以下と考えると，切り出し精度としては若干これに及ばない．

距離画像の補間と切り出し精度の関係について評価するために，図 3.17，図 3.19 に示す形状が既知の白色物体を計測し，背景白（前景背景間のコントラスト小），背景カーテン（同中），背景黒（同大）の条件で切り出した．表 3.7，表 3.8 は，図 3.17，図 3.19 の白線領域内の矩形領域および半円領域を切り出した際の正規化切り出し誤差を示す．切り出し誤差は，背景黒で撮影したカラー

図 3.17: 形状既知の被写体（幅 225mm の矩形板）

(a)1 フィールド　(b)2 フィールド　(c)4 フィールド

図 3.18: RGB の情報を用いず補間した距離データにより切り出した前景

画像の輝度による 2 値化結果との差違（画素数）を，領域の輪郭長（4 近傍）で正規化している．表 3.7 において，スリット光走査の周期を 1 フィールドから 2 フィールド，4 フィールドと変化させると，RGB の情報を用いない補間では正規化切り出し誤差が 3.72 画素から 2.56 画素に低減されている．図 3.18 は，RGB の情報を用いないで補間した距離画像による矩形領域の切り出し結果（スリット光走査周期 (a)1 フィールド，(b)2 フィールド，(c)4 フィールド）である．スリット光走査の周期を複数フィールド周期にすることにより，切り出し誤差が低減されている．

表 3.7，表 3.8 において，スリット光走査の周期が 1 フィールドの場合，RGB の情報を用いた補簡により，前景背景間のコントラストが高いほど切り出し精度が改善され，RGB の情報を用いない場合の切り出し誤差（矩形：3.72 画素，半円形 2.84 画素）と比べて，それぞれ最高で 2.05 画素，1.05 画素に低減されている．図 3.20 は，RGB の情報を用いて補間した距離画像による半円形領域

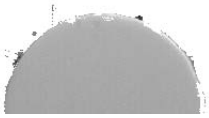
の切り出し結果である．RGB の情報を用いることにより，切り出し誤差が低減されることと，RGB の情報のコントラストが高いほど切り出し誤差が低減されることがわかる．

表 3.7，表 3.8 において，スリット光走査の周期 4 フィールドで前景背景間のコントラストを大きくした場合に，切り出し誤差が最小にはなっていない．これは，カメラキャリブレーションの誤差による距離データの画素座標値の誤差のために，計測点数が増えた場合に RGB の情報を用いた距離データが正しく補間されず，切り出し誤差の低減が頭打ちになっていると考えられる．

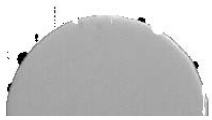
図 3.19: 形状既知の被写体（直径 180mm の半円板）

(a)RGB 情報なしで補間

(b)RGB 情報ありで補間
（コントラスト小：背景白）



(c)RGB 情報ありで補間
（コントラスト中：
背景カーテン）



(d)RGB 情報ありで補間
（コントラスト大：背景黒）

図 3.20: RGB の情報を用いて補間した距離データにより切り出した前景

表 3.7: 切り出し誤差の比較（矩形物体）

Depth Interpolation		Scan Cycle of Slit Lights		
		1	2	4
without RGB		3.72	3.67	2.56
with RGB	White Background	2.95	2.99	2.58
	Curtain	2.41	3.66	2.63
	Black Background	2.05	3.11	2.70

表 3.8: 切り出し誤差の比較（半円形物体）

Depth Interpolation		Scan Cycle of Slit Lights		
		1	2	4
without RGB		2.84	3.51	3.54
with RGB	White Background	2.27	3.28	3.37
	Curtain	1.71	2.43	3.18
	Black Background	1.05	1.93	2.76

3.5　まとめ

専用の素子を用いずに，ビデオレート動作を実現するレンジファインダの方式を提案した．2m±50cm の被写体距離の測定を目的として試作をした．距離計算と視点変換の計算結果を LUT として，ビデオレート動作を実現した．試作機の計測可能範囲は，1,600mm から 2,700mm の範囲，計測精度は，測定距離に対して標準偏差で 0.4%以下である．

距離情報を用いてカラー画像からオブジェクトを精度よく切り出すために，スリット光走査を複数フィールド周期で変化させ，各赤外カメラによる計測時に生じるオクルージョンを互いに補いあうことにより，距離画像の水平解像度を改善した．複数フィールド周期のスリット光走査は，距離画像上で計測点を移動してインターリーブさせることになる．2 フィールド周期，4 フィールド周期のスリット光走査により，1 フレームあたり水平 108 点および 216 点，垂直 426 点の解像度の距離画像を得た．また，フィールド間で固定のスリット光走査と比較して，複雑な形状（人形）に対する切り出し誤差を，それぞれ約 2/3,

4/9 に低減した．

カラー画像の情報を用いて距離画像を補間した．カラー画像の情報を用いない距離画像の補間と比べて切り出し誤差を最高で 63%低減した．

補間した距離画像を用いた画像の切り出しは，ブルーバックを用いたクロマキーの様に，背景が一定の色である必要はなく，背景が一定の色でない場合にも適用できる．

今後は，レンズ歪の考慮と較正面数の増加によりキャリブレーションの精度を向上させ，切り出し精度の改善を図る．また，被写体の動きが速い場合には，複数フィールド周期でスリット光を走査すると，被写体の動きに起因する計測誤差が生じると考えられる．この影響についての検討も今後の課題である．また，階層符号化に適用した場合の有効性について検討する．

第4章

レーザライン光走査による光強度変調方式レンジファインダのビデオレート動作

4.1 まえがき

インターネットの普及やディジタル衛星放送の開始に伴い，ディジタル動画像が身近なものとなってきている．動画像圧縮符号化の次世代標準方式であるMPEG4 [32] では，動画像をオブジェクト毎に階層化（部品化）し符号化することが提案されている．画像の部品化により，伝送路の状態や送信側，受信側の意図を反映したオブジェクト毎の情報量（画像の場合画質）の制御が可能となる．部品化し画質制御した前景，背景をさし替えることで，多様な映像コンテンツを容易に作成できるようになる．

現状では自然画像のオブジェクト階層化には，クロマキー技術を用いる大がかりなスタジオセットや，手作業による繁雑な切り出し作業を要する．これらの課題を解決するためには，通常のカラー映像と同時に距離情報を撮像し，距離によって被写体を分離する奥行きベースの階層化技術が有効である．本論文では，カラー動画像と同時に距離動画像を撮像することが可能な高速レンジファインダの開発について述べる．

対象物に光を投射し，これをカメラで撮影するアクティブレンジファインダは有効な形状計測方法として種々のものが提案されている．Carrihill [47] は，スライドプロジェクタにより投射される2通りの光強度変調パターンの強度比から光源からの角度を得，これとカメラからの角度，基線長を用いた三角測量により，画素毎に被写体の距離情報を計算する方式（光強度変調方式）を提案している．

われわれは，フィールド毎に光強度変調パターンを切り替えることで、光強度変調方式を動画に適用する．この場合，Axi-Vision camera [102] で用いられている様な数十MHzの高速変調は不要なため，特殊な部品を用いずに，レー

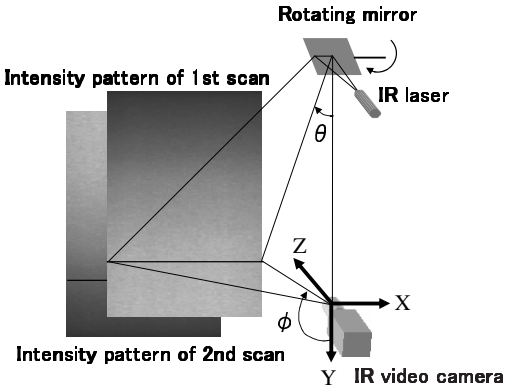


図 4.1: レーザ光走査による光強度変調方式

ザ光源，回転ミラー，カメラをフィールド周波数（60Hz）で同期制御することにより，コストを抑えてレンジファインダを構成できる．しかし，上記光強度変調方式の単純な動画化においては，以下の 3 つの原因により精度が低くなることが課題となる．

（1）投射光以外の周囲の光（背景光）による距離測定値のシフト．

（2）ビデオ信号のノイズによる距離測定値のばらつき．

（3）被写体の動きによる，被写体の輪郭付近における距離測定誤差．

（1）と（2）に対しては，レーザ光源と干渉フィルタを用いた狭帯域光計測を行う．回転ミラーの角速度制御によって光強度を変調することで，パターン光の光利用効率を改善し，投射光強度を安定化させる．これにより，背景光の影響とビデオ信号のノイズの影響を低減する．また，干渉フィルタを用いると，干渉フィルタの周辺減光による画像周辺部での光量低下が新たな問題となる．この点に対しては，光学系によりスリット光の周辺部へ光パワーを割り当て，干渉フィルタの透過ピーク波長を選択し，さらに，回転ミラー制御により走査範囲の周辺部へ光パワーを割り当てることで，画像周辺部での光量を確保する．

（3）に対しては，動物体の輪郭付近で顕著に生じる距離誤差を低減するための，距離画像のフィールド間メディアン処理を行う．

以上の検討結果に基づいて実動作機を試作し，ビデオレート距離画像計測を可能とした．提案方式では，近赤外波長のレーザ光源と干渉フィルタを用いるため，周囲光の影響を低減させることができる．そのため，屋内蛍光灯照明下でも距離画像が計測できる．

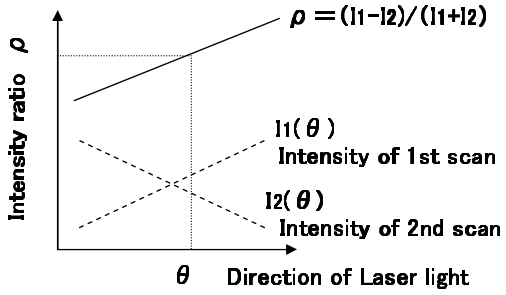


図 4.2: 光強度比と光源からの角度 θ との関係

4.2　レーザライン光走査による光強度変調方式

4.2.1　光強度変調方式

Carrihill により提案された光強度変調方式 [47] は，光源からの角度，カメラからの角度，基線長を用いた三角測量により，画素毎に被写体の距離情報を計算する．光源からの角度は，スライドプロジェクタにより投射される 2 通りの光強度変調パターンの強度比から得る．この方式は，光強度比から距離を計測するので，被写体の反射率が極端に小さい場合を除き，被写体反射率の影響を受けずに距離を計測できる．

4.2.2　レーザライン光走査

背景光とビデオ信号ノイズの影響による距離測定誤差を低減するため，筆者らは，パターン光投射による光強度変調の代わりに，フィールド期間に同期したレーザライン光走査により光強度を変調し，被写体からの反射光は干渉フィルタを付けたカメラで狭帯域に限定して撮像する．レーザライン光走査による光強度変調は，レーザ光源の電流制御と回転ミラーの角速度制御によるものが考えられる．前者は，レーザに流す電流を変調すると，観測される光強度が不安定になり，計測できない場合がある．これは，電流変調によりレーザ光がチャープ（レーザ発振波長が変化）し，狭帯域光計測のために用いる干渉フィルタを通過する光量が減少するためと考えられる．これを防ぐため，後者の方法により，レーザの光強度を一定にし回転ミラーの角速度を制御して光強度を変調する．

図 4.1 は提案する方式の動作を説明する図である．ここで，カメラの光軸をワールド座標系の Z 軸とし，また，カメラの撮像面は XY 面と平行であると

する．なお，図4.1には示していないが，撮像面上の画素位置は(x, y)として表し，x軸，y軸は，それぞれ，X軸，Y軸と平行とする．

光源のレーザパターンプロジェクタはY軸に平行なライン光を発する．回転ミラーはレーザライン光を走査し，パターン光を被写体に投射する．この時，投射光の変調パターンは図4.2にI_1，I_2として示すように，フィールド毎に異るものとなる様，カメラのフィールド期間に同期して回転ミラーの角速度を制御する．被写体からの反射光は干渉フィルタを付けたカメラで狭帯域に限定して撮像する．三角測量に必要な光源からの角度（レーザライン光の軌跡とXY面のなす角）θは，フィールド間の光強度比ρより観測し，カメラからの角度（着目画素を通るYZ面に垂直な面とXY面のなす角）ϕは画素座標値yから観測する．これらの角度と基線長D（カメラ，光源間の距離）を用いて，各画素について距離Zを式(4.1)より計測する．

$$Z = \frac{\tan\phi\tan\theta}{\tan\phi - \tan\theta}D = \frac{D}{\frac{1}{\tan\theta} - \frac{1}{\tan\phi}} \tag{4.1}$$

距離画像は，前フィールドと現フィールド間の光強度比を用いて，60フィールド/秒で取得する．式（4.1）による距離計算には，付録Bで述べるキャリブレーションによって予め用意した2つのLUT （Look Up Table）を参照する．第1のLUTより，画素値I_1，I_2より光源からの角度情報$1/\tan\theta$を得，第2のLUTより，$1/\tan\theta$と画素座標値yから距離Zを得る．

4.2.3　回転ミラーの角速度制御による光強度変調

角度誤差の分布を一様にするために，反射率一様なZ一定の拡散面上で，光強度比の分布を線型にすることを考える．2つの投射パターンI_1，I_2の光強度分布を逆符号，同一絶対値の条件で線型化し，光強度比を式(4.2)と定義することにより，その分布を線型化する．

$$\rho = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{I_1 - I_2}{const.} \tag{4.2}$$

カメラ視野内でのレーザライン光の入射角と反射角の変化による光強度の変化を無視すると，光強度Iはライン光の拡散面上での走査速度に反比例するので，

$$I \propto \frac{1}{\frac{d}{dt}Y} \tag{4.3}$$

と表せる．ここで，Yは拡散面上での走査位置であり，拡散面が$Z = Z_0$の位置に配置されている時，光源からの角度θと基線長Dより

$$Y = Z_0\frac{1}{\tan\theta} + D \tag{4.4}$$

となる．式（4.3）式（4.4）と，I が走査方向（Y 方向）に線形に変化することから，

$$I = \frac{\alpha}{\left|\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\tan\theta}\right)\right|} = A\frac{1}{\tan\theta} + B \tag{4.5}$$

となる．ここで，A の値は 2 つの投射パターン I_1，I_2 で同じ絶対値で正負の符号が異なる様にする．α と B の値は，光強度が非負の値のみをとることから非負であり，I_1，I_2 について等しくする．θ はライン光の照射方向（ミラーの角度と 1 対 1 に対応）である．式 (4.5) ではライン光の入射角と反射角の変化を考慮していないが，その影響は I_1，I_2 について等しい割合で生じるため，式 (4.2) による光強度比 ρ の計算時に打ち消される．式 (4.5) の解のひとつは，

$$\theta = \tan^{-1}\frac{1}{a\sqrt{t+b}+c} \tag{4.6}$$

となる[1]．上記 A，B についての条件と，式 (4.6) が式 (4.5) を常に満たす条件から，a は A と同じ符号となり，共に正の場合，

$$a = \sqrt{\frac{2\alpha}{A}} \tag{4.7}$$

共に負の場合，

$$a = -\sqrt{-\frac{2\alpha}{A}} \tag{4.8}$$

となる．b は，フィールド期間（t_f=1/60[s]）および，フィールド期間内の走査開始時と終了時の光強度の比 $I(0)/I(t_f)$ から，

$$b = \frac{(I(0)/I(t_f))^2}{1-(I(0)/I(t_f))^2}t_f \tag{4.9}$$

と表される．c は投射パターンのパラメータ A，B より，

$$c = -\frac{B}{A} \tag{4.10}$$

となる．これにより I_1，I_2 について，制御すべきミラーの運動が求められる．回転ミラーの角速度制御を用いた光強度変調により，電流制御を用いる場合と比較して，光強度最大最小比 10:3 の強度変調の際に光の利用効率を約 1.5 倍改善できる[2]．

[1] もうひとつの解 $\theta = \tan^{-1}\frac{1}{a\sqrt{b-t}+c}$ を用いても，時間方向に反転した波形で同様に制御できる．

[2] 電流制御により，光強度最大最小比 10:3 の強度変調をすると，計測空間に投射される光強度は最大強度投射時の (100+30)/2=65%となる．一方，角速度制御では常に 100%の光強度で投射でき，光の利用効率を約 1.5 倍にしたことになる．

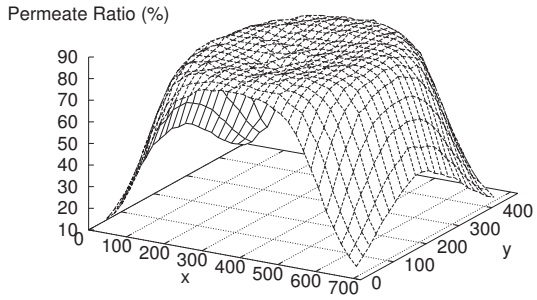


図 4.3: 干渉フィルタの周辺減光特性

4.2.4　周辺減光対策

干渉フィルタの透過ピーク波長は，入射光の角度が垂直からずれると短波長側に変化する．そのため提案方式では，通常のレンズ光学系で生じる cos4 乗則として知られる周辺減光に加えて，干渉フィルタの周辺減光が生じる．今回のシステムでは水平，垂直の視野角がそれぞれ ±7.5°，±5° であり，視野の上下左右の四隅では入射角が垂直から 9° 傾く．Z 一定の鉛直面に一様な強度で投射したレーザ光を撮影し，干渉フィルタがある場合とない場合を比較することで，上記の条件で生じる周辺減光（干渉フィルタの透過率分布）を測定した．結果を図 4.3 に示す．干渉フィルタの透過率は，画像中央部では 90%近い値になっているが，画像の上下左右の四隅では 10%まで低下している。

周辺減光への対策は，原理的には，周辺減光の程度に応じて投射光強度を制御し，2 次元的に行うべきである．しかし，今回のシステムでは走引方向（垂直）にしか投射光強度を変調できない．そのため，以下の対策により周辺減光によって生じる距離誤差の低減を図った．

（1）レーザスリット光の生成にプリズムを用いることでレーザスリット光の中央部よりも周辺部を明るくする [103] [3]．

（2）干渉フィルタの透過ピーク波長を，レーザ光の波長より数 nm 長くすることにより，透過率のピークを画像の中心から周辺部に移動させる．これにより，図 4.3 では，xy 面の中央部よりもその周辺の方が透過率が高くなり，その結果，透過率が一様な領域が拡げられている．

[3] レーザスリット光の生成にシリンドリカルレンズを用いると，スリット光の中央部に光強度が集中し，周辺減光が増してしまう．これに対して、今回光源とプリズムを対向させる Lasiris 社製レーザパターンプロジェクタのプリズム部分を用いてスリット光を生成した．

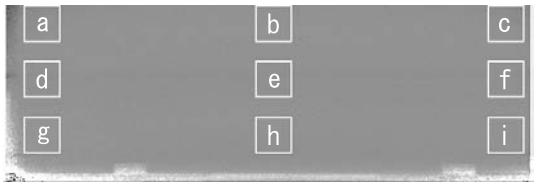


図 4.4: 周辺減光対策を評価した距離画像中の領域

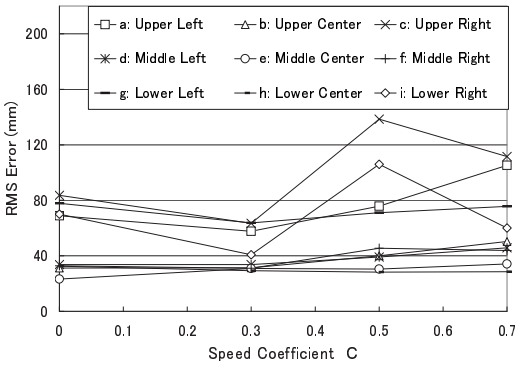


図 4.5: 周辺減光対策による距離誤差の低減効果

(3) 2.1 で述べた回転ミラーの角速度制御に対し，走引範囲の中央部と比べて周辺部の走引速度を遅くする．走引速度の補正は，2 次元的に変化する周辺減光の影響を最も低減する様に決定すべきであるが，レーザライン光は中央部と周辺部で強度が異なり，また，カメラと光源が視差を持つので被写体の距離の影響も受けるため，これを解析的に一意に決定するのは困難である．そのため，簡単のために走引角速度を，式（4.11）によりレーザライン光の走引中心からのずれ角 $\Delta\theta$ に線形に補正した．

$$\frac{d\theta_{c1}}{dt} = (1 - C\Delta\theta)\frac{d\theta}{dt} \tag{4.11}$$

式（4.11）の補正では走引範囲が変化するので，さらに以下の補正により走引範囲が変化しないようにした．

$$\theta_{c2} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{\theta_{c1max} - \theta_{c1min}}(\theta_{c1} - \theta_{c1min}) + \theta_{min} \tag{4.12}$$

ここで，θ_{min}，θ_{max} は走引範囲の θ の下限と上限であり，θ_{c1min}，θ_{c1max} は式（4.11）によるそれらの補正値である．式（4.11）の補正係数 C を変化させて走引角を補正し，距離値を計測し，その RMS 誤差を比較し

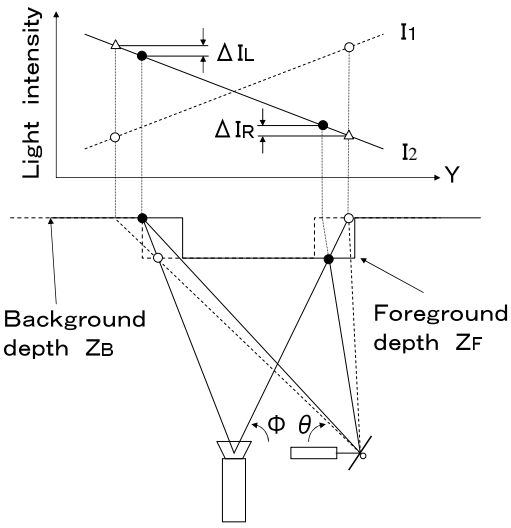


図 4.6: 被写体の動き影響

た．図 4.4 に示す距離画像（Z=2200mm に配置した較正面を距離計測したフィールド画像: 幅 720 画素，高さ 240 画素）内の各領域 a から i について，距離値の RMS 誤差を比較した結果を図 4.5 に示す．本論で示す距離画像は，画素値が大きく明るいほど距離値 Z が大きく，逆に，画素値が小さく暗いほど距離値 Z が小さい．図 4.5 において，横軸は，走引範囲の端部における掃引速度の補正係数である．図 4.5 から，四隅における RMS 誤差が他の領域と比べて大きいことと[4]，式（4.11）の補正係数 C を 0.3 にすることにより，画面全体についての RMS 誤差をほとんど劣化させずに，四隅における RMS 誤差を 2 割から 4 割低減できていることがわかる．

4.2.5　被写体の動きの影響低減

光強度変調を用いた方式では，2 枚の画像間（今回の場合フィールド間）で動きのある被写体について，特に輪郭附近で光強度比が正しく測定できないために，距離測定誤差が生じる．

まず，簡単のために，被写体，背景ともに一様で同一の反射率，また，両者ともカメラに正対している場合（一様な Z 値の場合）について考える．前

[4]図中，補正係数 0.5 の時の×印と◇印の RMS 誤差が大きくなっているのは，他の原因（同期信号系のノイズの混入）のためである．

表 4.1: 動く被写体についての光強度比

Current field	Contour position	
	Left	Right
1st	$\rho'_{L1} = \frac{I_1 - I_2 - \Delta I_L}{I_1 + I_2 + \Delta I_L} < \rho$	$\rho'_{R1} = \frac{I_1 - I_2 + \Delta I_R}{I_1 + I_2 - \Delta I_R} > \rho$
2nd	$\rho'_{L2} = \frac{I_1 - \Delta I_L - I_2}{I_1 - \Delta I_L + I_2} < \rho$	$\rho'_{R2} = \frac{I_1 + \Delta I_R - I_2}{I_1 + \Delta I_R + I_2} > \rho$

フィールドと現フィールドをそれぞれ第 1，第 2 フィールドとすると，被写体の左右の端部における投射光の輝度は，図 4.6 に示すように，第 1 フィールド，第 2 フィールドについてそれぞれ，被写体が動いていない場合には○と△，被写体が右へ動く場合には○と●になる．そのため後者では，2 フィールドの画像から光強度比を計算すると，光強度比から得られる光源からの角度 θ は，被写体の左側端部では被写体静止時よりも小さくなり，逆に，被写体の右側端部では大きくなる．この結果，計測される距離値は，被写体の左側端部では実際の距離値（図 4.6 中の Z_B）よりも小さくなり，逆に，被写体の右側端部では実際の距離値（図 4.6 中の Z_F）よりも大きくなる．ここで，計測される光強度比 ρ（すなわち角度 θ）の誤差の大きさは，現フィールドが第 1 フィールドか第 2 フィールドかによって異なる．これらの違いを表 4.1 に示す．表において ΔI_L，ΔI_R は，図 4.6 に示す様に，被写体の動きにより左右の端部で生じる輝度変化量の絶対値であり，ρ'_{L1}，ρ'_{R1}，ρ'_{L2}，ρ'_{R2} はそれぞれ上記輝度変化が生じた際の光強度比（第 1，第 2 フィールドについての被写体左右の端部における値）である．これらの値と被写体静止時の光強度比の値の差が距離誤差の原因となる．図 4.6 に示す投射パターンの場合，被写体の動きにより光強度比が静止時よりも大きくなった場合，距離値 Z も静止時と比べ大きく計測され，逆に光強度比が静止時よりも小さくなった場合，距離値 Z も静止時と比べ小さく計測される．そのため，距離誤差の符号（実際の距離値よりも手前に計測されるか，奥に計測されるか）は，移動する被写体の左側と右側で異なり，さらに，現フィールドが第 1 フィールドか第 2 フィールドかによってその大きさは異なる．

次に一般的な場合について考える．実際のシーンでは，被写体と背景の反射率は同一とは限らず，同一であっても，光源，反射面，カメラ間の距離差により，背景側が暗くなる．また，被写体の反射率は通常空間的に変化する．さらに，距離誤差は被写体の動きの大きさの影響も受ける．これらの要因は表 4.1 の ΔI_L，ΔI_R を増加させる．その結果，計測される距離値は，背景距離よりも大きく計測されたり，逆に被写体距離よりも小さく計測される場合がある．そ

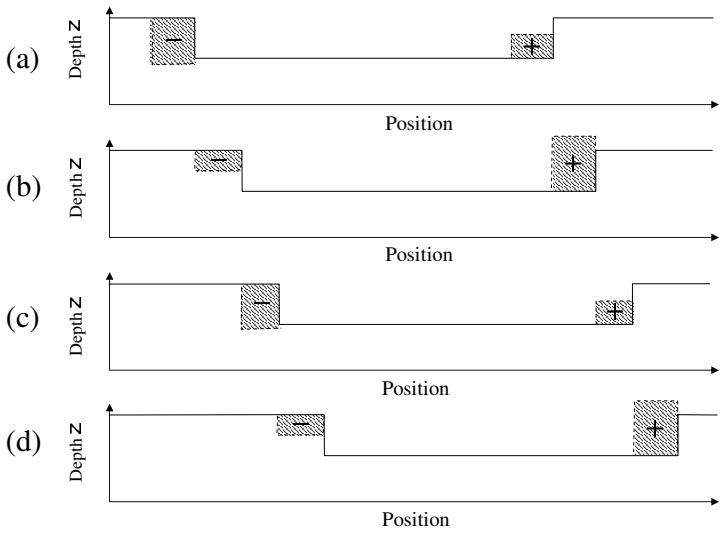


図 4.7: 被写体の動きによる距離誤差

の様な場合の様子を図 4.7 に示す．図中 (a) から (d) は，移動する被写体についての連続する 4 フィールドの距離値の断面分布であり，第 1 フィールド（(a) と (c)）と第 2 フィールド（(b) と (d)）が交互に繰り返される様子を示す．図の被写体輪郭付近において，実線は真の距離値，破線は計測される距離値である．ここで，距離値が前景より手前や背景より奥に測定される様な，大きな距離測定誤差が生じるのは，被写体の輪郭が着目位置を通過する際の 1 フィールドのみである．そのため，前後のフィールド間で時間方向にメディアン処理をすることにより，図 4.7(b) の右側や (c) の左側の被写体輪郭部分の距離測定誤差は、前景と背景の距離差の範囲内に抑圧できる．

動きによる物体輪郭付近での距離測定誤差を評価するために，図 4.8 に示す様に，鉛直面（長方形の白色平板）を Z 値が一定の面内に配置し，Y 軸方向には移動台で，Z 軸方向にはレール上をスライドさせ，距離値を測定した．そして，静止した鉛直面を測定した距離値と比較した．鉛直面を Z=2400mm の距離に静止させて測定した距離画像を図 4.10 に示す（背景は Z=3200mm）．また，Y 軸方向と Z 軸方向にそれぞれ鉛直面を移動させた場合の，図 4.9 の A で示す上端付近の距離画像の鳥瞰図を，図 4.11 図 4.12 に示す．図 4.11 図 4.12 において (a)，(b)，(c) は，フィールド間で 4pixel の動きを与えた時の距離画像 3 フィールドである．被写体の動きに起因した大きな距離測定誤差が，輪郭部附近でフィールド毎に交互に逆向きの値で発生している．距離測定誤差を低減させるために，各画素における距離値を，前フィールド，現フィールド，次

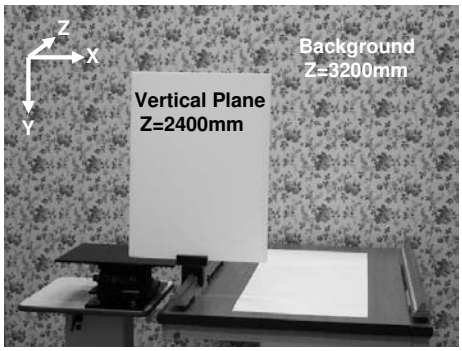


図 4.8: 被写体の配置と動きの方向

図 4.9: 被写体静止時の距離画像（幅 720，高さ 240 画素）

フィールドの 3 フィールドのメディアン値とするフィールド間メディアン処理を行った．その結果を図 4.11(d)，図 4.12(d) に示す．

フィールド間メディアン処理による距離測定誤差の低減効果を図 4.13 に示す．図 4.13 において，横軸は輪郭部のフィールド間での縦方向の動き（pixel/field）を示し，縦軸は被写体静止時の距離画像に対する RMS 誤差を示す．RMS 誤差は，図 4.9 の A で示す白線で囲った被写体の上端近傍領域（幅 210 画素，高さ 15 画素の矩形領域）について計算した．水平輪郭部のフィールド間の上下方向の動きは，連続的に撮影した画像シーケンス中で基準となるフィールド（現フィールド）について，SAD 値を評価値とするブロックマッチングにより計算した．動きの量は，現フィールドとペアにするフィールド番号を変えることにより変化させた[5]．動きによる輪郭付近での距離測定誤差は，フィールド間メディアン処理により，動きが Y 軸方向の場合 3 割から 5 割に，動きが Z 軸方向の場合 5 割に抑圧されている．

フィールド間メディアン処理により距離測定誤差が低減するのは，物体輪郭のフィールド間の動きにより，前景輝度と背景輝度の比から計算される誤った距離値を，前後のフィールドにおける前景どうしもしくは背景どうしの輝度値

[5] このことは，今回の評価では動きが速くなることによる画像のぼけについては評価できていないことを示す．動きによるぼけについての考察は，今後の課題である．

から計算した距離値に置き換える作用があるからである．そのため，動きがＹ軸方向の場合の方が，動きがＺ軸方向の場合よりも，距離測定誤差は小さくなる．

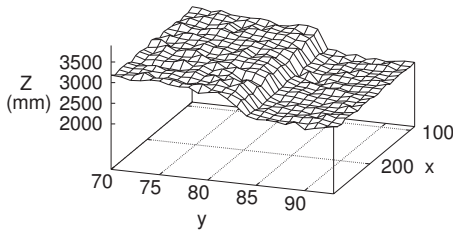
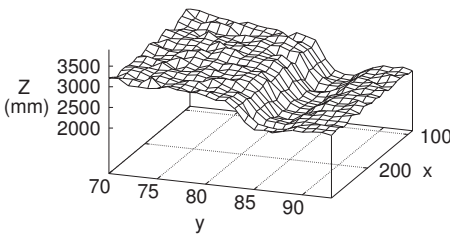
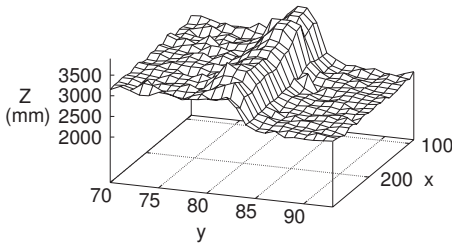


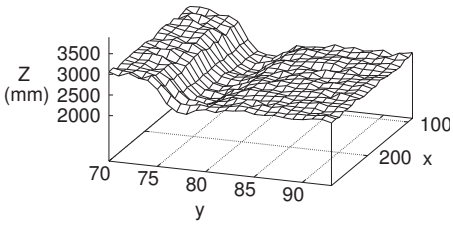
図 4.10: 被写体静止時に計測される輪郭付近の形状



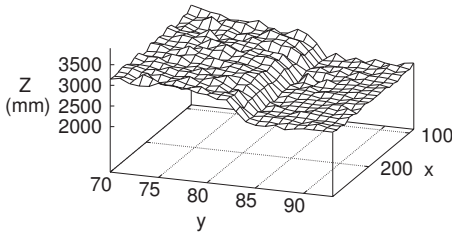
(a) 前フィールド



(b) 現フィールド

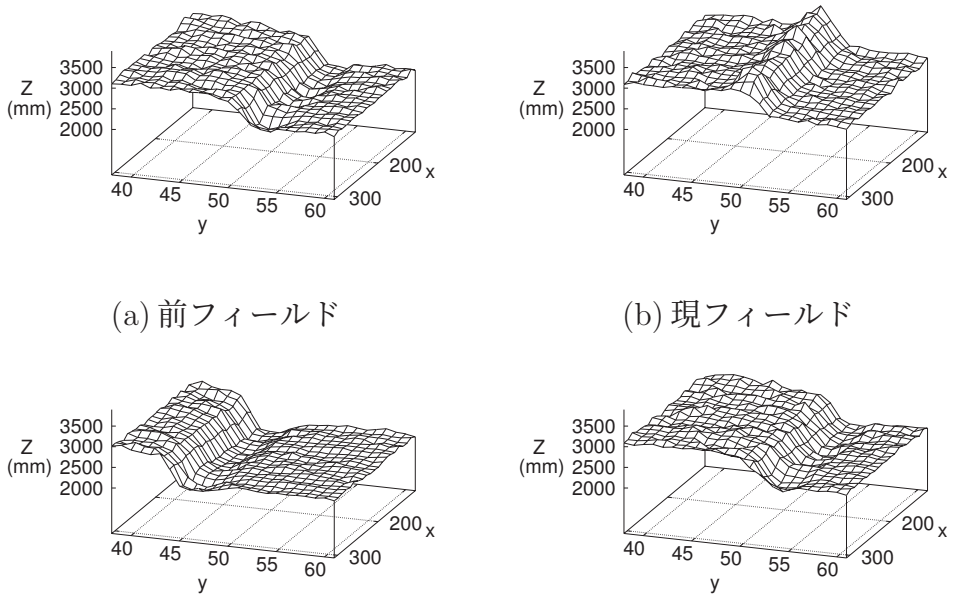


(c) 次フィールド



(d) メディアン処理結果

図 4.11: フィールド間メディアン処理による距離測定誤差の低減結果
（被写体動き Y 方向，4pixel/field）



(a) 前フィールド　(b) 現フィールド

(c) 次フィールド　(d) メディアン処理結果

図 4.12: フィールド間メディアン処理による距離測定誤差の低減結果
（被写体動き Z 方向，4pixel/filed）

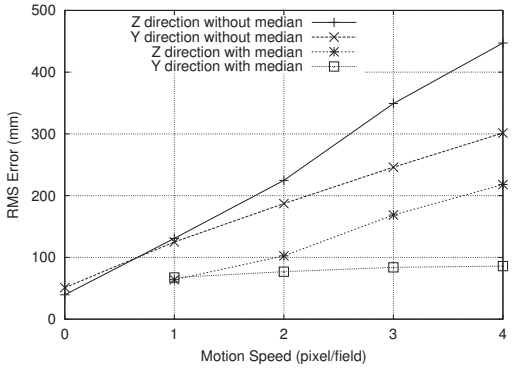


図 4.13: 動きと距離測定誤差の関係

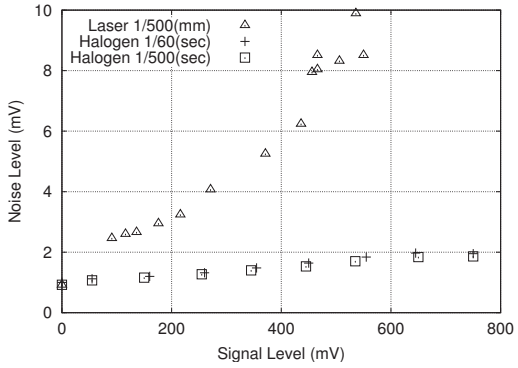


図 4.14: 信号レベルとノイズレベルの関係

4.3 システム性能評価

4.3.1 信号レベルとノイズレベルの測定

光強度変調方式の距離測定性能を決定するのは，入力ビデオ信号の S/N である．光源のコヒーレンスの有無によるノイズレベルの相違を確認するため，光源にハロゲンランプとレーザパターンプロジェクタを用い，ビデオ信号のノイズレベルと信号レベルを測定した．

両光源についての測定結果を図 4.14 に示す[6]．図 4.14 から，レーザ走査光のノイズレベル（◇印）がハロゲン光源のノイズレベル（電子シャッタなし（露光時間 1/60sec)+ 印，電子シャッタあり（露光時間 1/500sec）□印）と比較して数倍大きいこと，レーザ走査光のノイズレベルは信号レベルの 1 %強のレベル（S/N で 40dB 弱）であることがわかる．光源の違いによるノイズレベル増加の主な原因は，レーザ光源を用いた際に撮像した画像にランダムな模様が生じることから，スペックルの発生のためであると考える．

4.3.2 被写体反射率の測定精度への影響

測定精度に対する被写体反射率の影響を定量化するために，既知の距離に異なる反射率（色）の被写体を配置し，距離を測定した[7]．表 4.2 に示す 14 種類の色指標（Panton 社製カラーペーパー）ついて測定した距離値と輝度レベルの関係を図 4.15 に示す．図 4.15 において，横軸は平均輝度レベル，縦軸は距離である．各色指標は 500mm，600mm，700mm の 3 通りの距離に配置した。

[6]カメラにふたをした状態での信号レベル（45mV）をペデスタルレベルとし，その値を引いた値を示している

[7]本節における距離測定には，付録 B.1 で述べる基線長の推定結果を用いている．

表 4.2: 被写体に用いたカラーペーパーの色と色番号

Color	Color No.	Color	Color No.
White	White	Gray 5	Cool Gray 1
Black	Black 4 2X	Blue	300
Red	485 2X	Sky blue	298
Gray 1	419	Green	354
Gray 2	425	Orange	Orange 621
Gray 3	Cool Gray 9	Yellow	115
Gray 4	Cool Gray 6	Violet	Violet

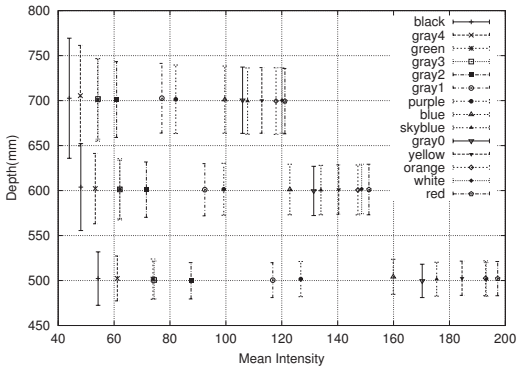


図 4.15: 距離測定値に対する被写体反射率の影響

図中の各データとエラーバーは，距離画像の中央部分（フィールド画像中の左上 $(x, y) = (110, 55)$ から右下 $(552, 168)$ までの矩形領域）での距離値の平均値と距離値の標準偏差である．図から平均輝度レベル 80 以上の場合には，反射率（被写体の色）の影響をほとんど受けずに測定できていることと，平均輝度レベルが 80 以下になると測定精度が低下し，距離測定値の標準偏差が大きくなることがわかる．

4.3.3　ビデオレート動作システムの試作

性能改善のための検討結果を反映させて，処理部をハードウェア化した．また，光源部とカメラ部を縦型配置で一体化したヘッド部を試作した．図 4.16 にハードウェア化した処理部のブロック図を，図 4.17 に試作装置のヘッド部外

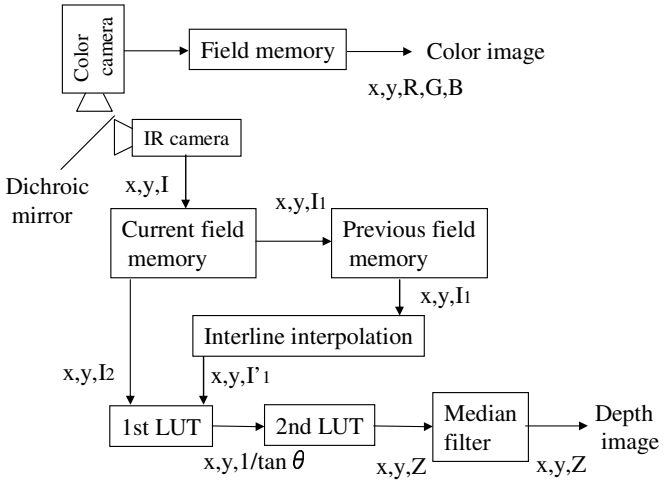


図 4.16: ビデオレート動作システムの構成

観を示す．試作システムでは，赤外カメラにイメージインテンシファイア付きCCD カメラ (浜松ホトニクス製 C5909–10) を用いて，測定可能距離を拡大している．C5909–10 の感度は，方式評価時に用いた赤外カメラ（浜松ホトニクス製 C5999）と比べて 5 倍程度に設定している．また，光源には波長 836nm，出力 150mW の半導体レーザを用いている．

4.3.4 試作システムの距離測定精度

距離計算用の LUT（入力：輝度 8bit×2CH，y 座標値 9bit，出力：距離値 8bit）を作成するために，複数の較正面（Z=2200mm から 3000mm まで 200mm 間隔で 5 面）について，蛍光灯照明のない状態で各 100 フレームの画像を取り込んだ．各較正面についての平均画像を用いてレンジファインダのキャリブレーションを行った．作成した LUT を用い，10cm 毎の距離の鉛直面を蛍光灯照明がある場合とない場合について，2 フィールドずつ距離値を計算した．計算結果を図 4.18 に示す．図中 $\sigma_{\Delta Z}$ は距離計測値の標準偏差である．2200mm から 3000mm の距離範囲では，蛍光灯照明の有無によらず，距離値は平均 1.4%の相対誤差（RMS/Z）で計測されている．さらに，3200mm から 4000mm の距離範囲についてもキャリブレーションを行い LUT を作成した[8]．3200mm から

[8]今回のシステムでは，較正面の可動範囲が 800mm であることと，2200mm から 4000mm の範囲をカバーする合焦範囲を得られないために，2200mm から 3000mm と 3200mm から 4000mm の距離範囲について個別にフォーカスを調整しキャリブレーションをしている．合焦範囲の拡大は今後の課題のひとつである．

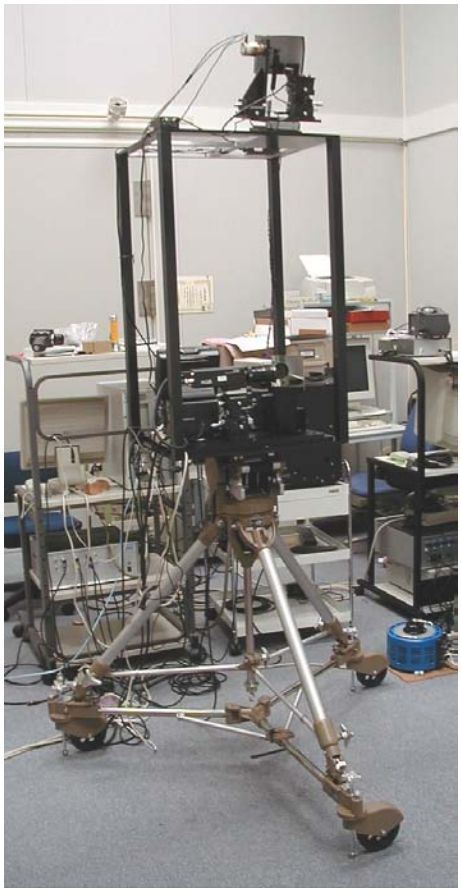


図 4.17: 試作機 (基線長 90cm) のヘッド部外観

4000mm の距離範囲では，図 4.18 に示すように，蛍光灯照明なしの場合平均 2.1%，蛍光灯照明ありの場合 2.2%の相対精度で計測されている．

蛍光灯照明の有無による距離計測値の平均相対誤差（$\overline{\mathrm{RMS/Z}}$）の増加は 0.1% 未満であることから，2200mm から 4000mm までの距離範囲で蛍光灯照明の影響をほとんど受けずに計測できていることがわかる．

4.4　まとめ

光強度変調方式を改良し，簡単な構成でビデオレート動作が可能なレンジファインダを提案した．光強度変調方式のビデオレート動作化は，高速変調を必要としないためコストを抑えられるが，距離測定精度が低い点が欠点である．これに対し以下の検討を行い，光強度変調方式の単純な動画化方式と比べて改善効果が得られることを確認した．

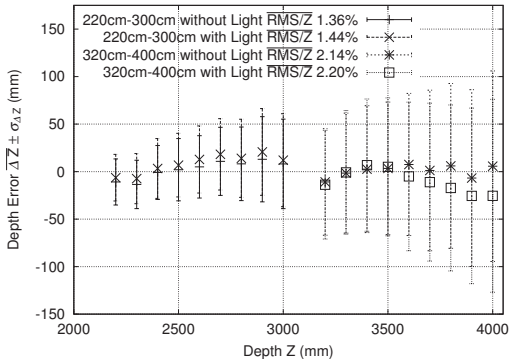


図 4.18: 試作機の距離測定精度

- 投射光以外の周囲の光（背景光）による距離測定誤差とビデオ信号のノイズによる距離測定誤差をを低減するために，レーザライン光のミラー走引による光強度変調と干渉フィルタを用いた狭帯域光計測を行い，蛍光灯照明下での距離画像計測を可能とした．回転ミラーの角速度制御によって光強度を変調することにより，チャープ現象の影響（干渉フィルタを透過する光強度の揺らぎ）をなくし，レーザパワー制御による光強度変調と比較して光利用効率を約 1.5 倍に改善した．

- 干渉フィルタの周辺減光の影響による画像周辺部での距離測定誤差の増加を抑えるため，スリット光生成光学系により視野周辺部へ光パワーを割り当てた．また，干渉フィルタの透過ピーク波長をレーザ波長より短くなるよう選択し，透過率が一様な領域を拡大した．さらに，カメラ視野周辺部での光走引速度を中央部と比べて遅くすることにより，周辺減光による距離誤差の低減を図った．これにより，周辺減光の対策をしない場合と比較して，画面全体についての RMS 誤差をほとんど増加させずに，距離画像の周辺部における RMS 誤差を 2 割から 4 割低減した．

- 動物体の輪郭付近で顕著に生じる距離誤差を低減するため，距離測定値に対する時間フィルタリング処理について検討した．時間メディアン処理により，輪郭部で生じる距離測定誤差を 3 割から 5 割に低減した．

上記性能改善のための検討結果を反映させて，処理部をハードウェア化した．また，光源部とカメラ部を縦型配置で一体化したヘッド部を試作した．イメージインテンシファイア付き CCD カメラを用いて，提案方式により 4m までの距離について 60 フィールド毎秒の距離画像計測を実現した．90cm の基線長で，2m20cm〜3m の被写体について 1.4%，3m20cm〜4m の被写体について 2.1%〜2.2%の平均相対精度を実現した．

第5章

ストロボ光源と遮光板を用いた簡便なレンジファインダ

5.1 まえがき

広帯域ネットワークの普及により，誰もが大量の情報をやりとりできる環境が急速に整いつつある．ネットワーク上のコンテンツとして画像は重要なものである．単に画像を伝送するだけでなく，奥行き情報を用いて画像を部品化（オブジェクト階層化）することで，前景，背景のさし替え等の合成が可能となり，多様な映像コンテンツを容易に作成できる．また，立体情報をやりとりすることにより，平面的な画像だけでは伝えきれない情報を伝えることが可能となる．本論文では，このような立体情報を低コストで簡便に得ることを目的としたストロボ光源を用いたレンジファインダの開発について述べる．

対象物にパターン光を投射し，これをカメラで撮影するアクティブレンジファインダは，有効な形状計測方法として種々のものが提案されている [42–45, 47, 102]．Carrihill ら [47] は，被写体に異なる輝度パターンを投射し，反射光の輝度比から 2 通りの方法で奥行きを計測している．第 1 の方法では，輝度比と光源からの角度の関係を計測空間全体についてひとつ記憶し，これと画素座標値（カメラからの角度と 1 体 1 に対応）と基線長を用いて，三角測量により奥行きを計測する．第 2 の方法では，画素座標値 (x, y) における輝度比と奥行き値（3 次元座標の Z 値）との関係に多項式を当てはめ，光強度を直接奥行き値に変換している．第 1 の方法では，カメラの視野内で輝度比と光源からの角度との関係が垂直方向に一定でないと，奥行き測定誤差が大きくなる．第 2 の方法については，全ての画素について個別に輝度比と奥行き値との関係式を記憶するためには画素数の数倍（上記関係式が 3 次式の場合，画素数の 4 倍）のパラメータを記憶する必要があり，小型カメラに適用するにはメモリ容量が大きくなる．そこで，10 画素程度の間隔で設定した代表画素について上記関係式を記憶し，残りの他の画素についての関係式は近傍の関係式を補間して決定することが考えられる．しかしその場合，代表画素における関係式のパラメー

タ計算には，1万元以上（VGAサイズの画像の場合，横65点×縦49点×4パラメータ/点）の連立方程式を解く必要がある．

パターン光投影による一般のアクティブレンジファインダにおいては，

- 複雑な光学系を用いる場合には，システム全体が大がかりなものになってしまう．
- 三角測量の原理による方法では奥行き画像中にオクルージョンが生じる．

ことが課題であり，個人ユースに向くようなものはこれまでなかった．

これに対し筆者らは，機能を静止画に限定し，カメラに連続2回もしくは4回のストロボ撮影機能を追加し，PC上で信号処理をすることにより，特殊な素子や大がかりなシステムを用いずに，簡単に奥行き情報や形状情報を入力することを可能にする．この方式は，既存のデジタルカメラもしくはスナップショット機能（静止画撮影機能）をもつハンディ型ムービーカメラにも適用可能である．提案方式では，ストロボ光源の前に位置をずらして窓を配置することで，ミラー等による光走査をせずにグラデーションパターンを得る．奥行きは，2つの投射光の輝度比と画素座標値から，三角測量により計算する．上記ストロボを用いた光源では変調方向と垂直な方向にも投射光が変化する．これに対して，輝度比を光源からの角度に変換する係数をエピポーラ線毎（実装は水平ライン毎）に持つことにより，上記変換係数を一組だけ持つ場合よりも計測精度を改善する．

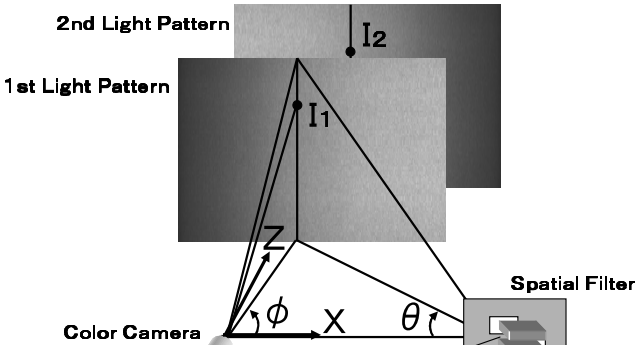
オクルージョンの発生に対しては，2セットの光源部をカメラの両側に配置し，オクルージョン位置の異なる奥行き画像を統合することにより，低減を図る．

5.2　ダブルストロボレンジファインダ

5.2.1　測定原理

ダブルストロボレンジファインダの構成図を図5.1に示す．写真用ストロボ2灯は，カラーカメラのフィールド露光タイミングに合わせて時分割で順次発光する．第1，第2フラッシュ光パターン投光時の画像は，カラーカメラで撮像されPCに取り込まれる．2種類の光パターンは，図5.2に示すように水平方向に単調増加，単調減少のパターンである．2枚の画像間の輝度比$\rho = I_1/I_2$と光の方向θの関係は，カメラのγ特性を線形にし，一意に対応するようにする[1]．各画素について輝度比を求め，これと予め用意した輝度比ρとθの関係

[1]線形な輝度特性が出ない場合，テーブルにより補正すればよい．



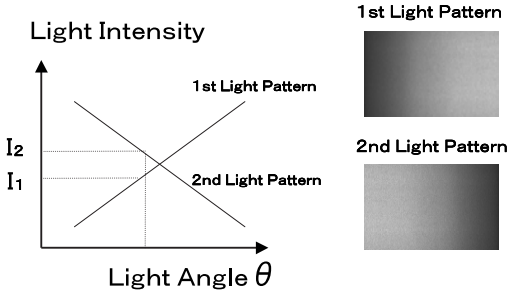


図 5.2: 投射パターン光強度と光源からの角度の関係

を用いて，パターン光の方向 θ を求める．その後，注目画素とカラーカメラのレンズ中心を通る直線を求め（ϕ を決定），三角測量によって注目画素の奥行き値 Z を計算する．Z と角度 θ，ϕ，基線長 D の関係は以下の式で与えられる．

$$Z = \frac{\tan\theta\tan\phi}{\tan\theta + \tan\phi} D \tag{5.1}$$

5.2.2 ダブルストロボ光源

光源は，図 5.1 に示すように 2 個の長方形の穴と直管型キセノンランプによるストロボにより構成されている．均一に発光する直線状光源（キセノンランプ）の横方向半分を遮光板で遮光すると，被写体に対して横方向に単調に光量

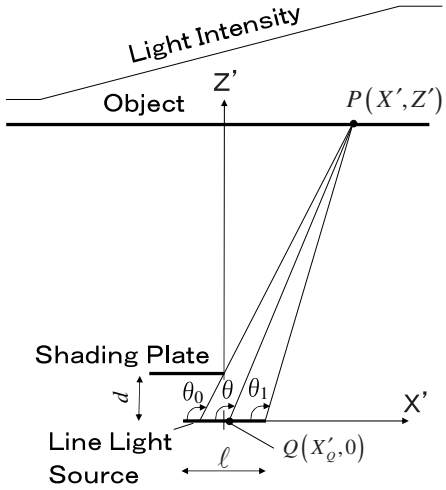


図 5.3: 遮光板を利用した光パターン生成

が変化する光パターンを作成することができる．これは，被写体位置が横方向に変化すると，その位置から見える光源の長さが単調に変化するからである．図 5.3 の物体面上の点 P における反射光強度 I は，線光源を構成する点 Q からの距離の 2 乗に反比例し，入射角の余弦に比例する（すなわち拡散反射する）と仮定すると，

$$I(X', Z') = A \int_{X'_0}^{X'_1} \frac{\cos(\pi/2 - \theta)}{(Z'/\sin\theta)^2} dX'_Q \tag{5.2}$$

となる．ここで，A は光源の強度を示す比例定数，X'_0，X'_1 は点 P から見える線光源の範囲（左端と右端の X' 座標値）であり，θ は点 P と線光源上の点 Q を結ぶ直線 PQ と X' 軸の負の方向がなす角度である．図 5.3 における図形的な関係

$$Z' \tan\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = X' - X'_Q \tag{5.3}$$

から，dX'_Q と $d\theta$ の関係は

$$dX'_Q = -\frac{Z'}{\sin^2\theta} d\theta \tag{5.4}$$

となる．これを式（5.2）に代入して

$$\begin{aligned} I(X', Z') &= -A \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\cos(\pi/2 - \theta)}{(Z'/\sin\theta)^2} \frac{Z'}{\sin^2\theta} d\theta \\ &= \frac{A}{Z'} \left[\cos\theta\right]_{\theta_0}^{\theta_1} \end{aligned} \tag{5.5}$$

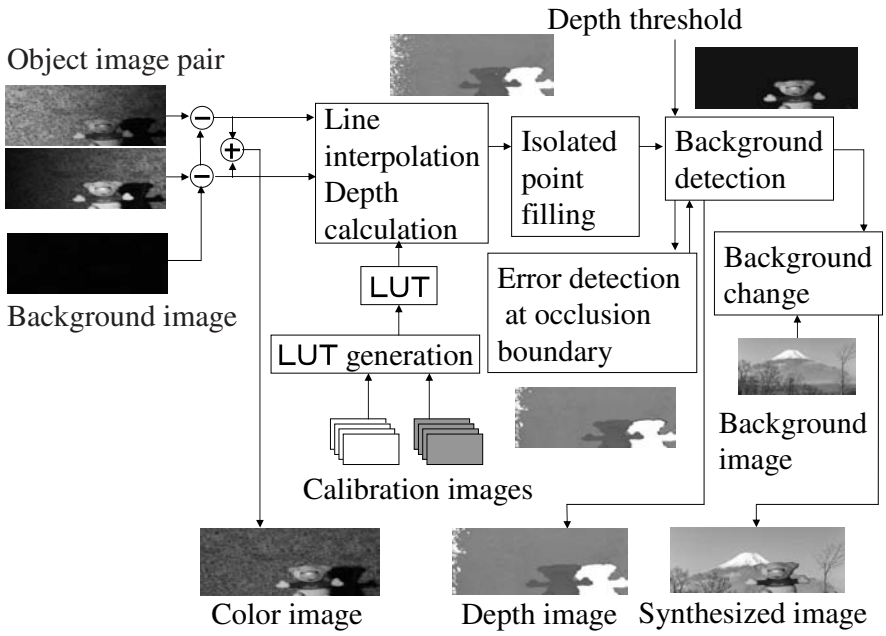


図 5.4: 奥行き計算とカラー画像の信号処理ブロック図

となる．

遮光板の位置を左右入れ替えた一組の光源を用意することによって，図 5.2 に示したような 2 種類の光パターンを生成する．

5.2.3 信号処理

信号処理のブロック図を図 5.4 に示す．キャプチャされた 2 種類の光パターン照射時の画像は加算平均されてカラー画像となる．2 種類の光パターンは互いに相補的であるため，加算すると均一なストロボ光での撮影画像と同様な画像となる．被写体の背景光が大きく光パターン照射無しの場合でも被写体が写る場合は，ストロボ光無しの場合に撮像した背景画像を差し引く．ただし，ガイドナンバー 20 程度の小さな写真用ストロボで 3m 程度までの被写体撮像の場合，蛍光灯照明下での室内撮影であればレンズ絞りは f24 以上であり，背景画像の画素値は殆ど 0 となる場合が多い．この場合処理を省略することもできる．その後，片方の画像のみ 1:2 インタレースによる垂直サンプリング位相の違いを補正する．

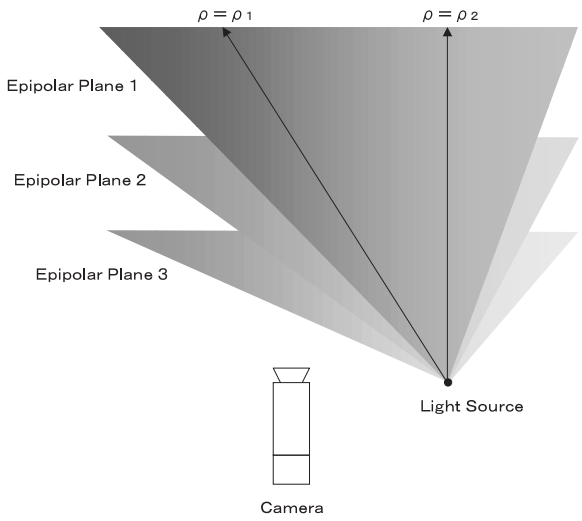


図 5.5: エピポーラ面上の輝度比の分布

5.2.4 エピポーラ拘束を用いた輝度比からの角度推定

2 つのストロボが充分小さく，また，両者の位置が充分近いと考えると，2 つの投射パターンを点光源によるものとみなしてその強度比 ρ の空間分布をモデル化することにより，画素座標値 (x, y) において輝度比 ρ を観測し，ρ から θ を求め，x から ϕ を求めることで，式（1）の三角測量により奥行き値 Z を計算できる[2]．ここで，輝度比一定の軌跡は 3 次元空間中の直線と近似できる．カメラのレンズ中心と光源を結ぶ線分（基線）を含む 1 つのエピポーラ面内の直線は，カメラで撮影すると全て同一のエピポーラ線上に撮影される．投射光の強度比が図 5.5 の様に変調方向と垂直な方向にも変化する場合，輝度比から角度 θ を得る計算モデルをエピポーラ線毎に持つ必要がある．

エピポーラ線は一般には画像中で水平とはならないが，画素座標の x 軸と基線を平行にすることによりエピポーラ線を平行にできる．この配置のもとでは，輝度比から角度 θ を得る計算モデルを画像のライン毎に持つことで，エピポーラ線毎の計算処理を簡単に実現できる．

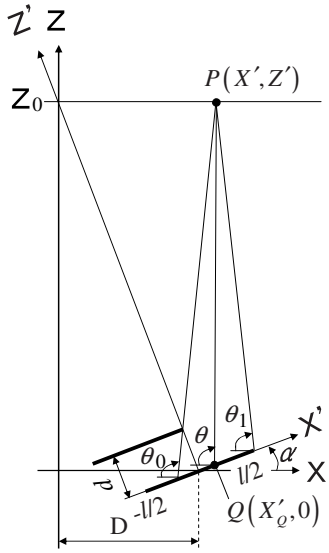


図 5.6: 線光源によるパターン投影

5.3　誤差要因の理論検討

5.3.1　線光源を用いることの影響

本レンジファインダでは，点光源を仮定して奥行きを計算しているが，用いている光源は長さ 13.5mm の線状光源（キセノン発光管）である．本節では，これにより生じる誤差を評価する．

線光源の中点を基準にした X'Y' 座標系を，図 5.6 に示す様に，基準奥行き Z_0 において Z 軸と Z' 軸が交差する様に傾けた配置のもとで，奥行き値一定の較正面に投影されるパターン光の反射光強度について考える．較正面上の点 P における反射光強度 I は線光源を構成する点 Q からの距離の 2 乗に反比例し，入射角の余弦に比例する（すなわち拡散反射する）と仮定すると，

$$I(X', Z') = A \int_{X'_0}^{X'_1} \frac{\cos(\pi/2 - \theta)}{(Z'/\sin(\theta + \alpha))^2} dX'_Q \tag{5.6}$$

となる．ここで，A は光源の強度を示す比例定数，X'_0，X'_1 は点 P から見える線光源の範囲（左端と右端の X' 座標値），θ は点 P と線光源上の点 Q を結ぶ直線 PQ と X 軸の負の方向がなす角度，α は図 5.6 に示す様に XZ 座標に対す

[2]本論では，投射光の強度の比を強度比、撮像後の輝度の比を輝度比と表記する．

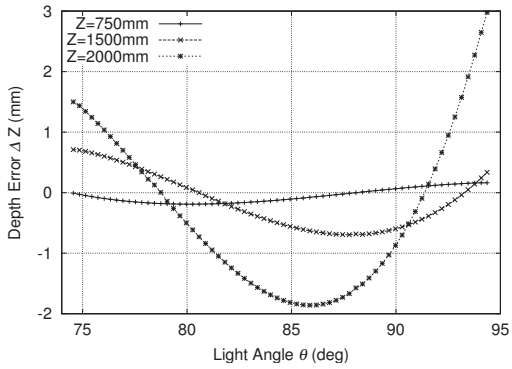


図 5.7: 線光源を用いることによる奥行き誤差

る X'Z' 座標の傾きである．式（5.2）の場合と同様の置換により，式（5.6）は

$$
\begin{aligned}
I(X', Z') &= -A \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\cos(\pi/2 - \theta)}{(Z'/\sin(\theta+\alpha))^2} \frac{Z'}{\sin^2(\theta+\alpha)} d\theta \\
&= \frac{A}{Z'} \left[\cos\theta\right]_{\theta_0}^{\theta_1}
\end{aligned} \tag{5.7}
$$

となる．ここで，θ_0，θ_1 は点 P から線光源を見た時の角度範囲の上限と下限である．線光源の長さ ℓ，線光源と遮光板の間隔 d より，

$$
\begin{aligned}
\theta_0 &= \cos^{-1}\left(\frac{-X'}{\sqrt{X'^2+(Z'-d)^2}}\right) - \alpha \\
\theta_1 &= \cos^{-1}\left(\frac{-X'+\ell/2}{\sqrt{(X'-\ell/2)^2+Z'^2}}\right) - \alpha
\end{aligned} \tag{5.8}
$$

となる．変調が逆のパターンについては，

$$
\begin{aligned}
\theta_0 &= \cos^{-1}\left(\frac{-X'-\ell/2}{\sqrt{(X'+\ell/2)^2+Z'^2}}\right) - \alpha \\
\theta_1 &= \cos^{-1}\left(\frac{-X'}{\sqrt{X'^2+(Z'-d)^2}}\right) - \alpha
\end{aligned} \tag{5.9}
$$

となり，これらより 2 つの反射光強度の比を得る．

線光源を用いることによる奥行き誤差を，図 5.7 に示す．図は，光源の線長 ℓ=13.5mm，遮光板と光源の間隔 d=30mm，基線長 200mm，カメラの水平視野 20° の条件で，Z=1000mm の拡散面上の反射光強度比分布に基づいて計算した．図 5.7 の θ は，図 5.6 おいて点 P と遮光板の端点を結ぶ直線と X 軸（負の方向）がなす角度である．上記条件下で，線光源を用いることによる奥行き誤差は，Z=750mm から 2000mm の範囲で最大で 3mm 程度である．

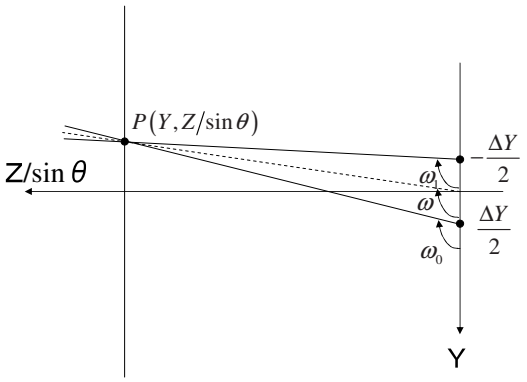


図 5.8: 上下に配置した 2 つの光源による光投影

5.3.2 2 つの光源を用いることの影響

本レンジファインダでは，単一の点光源を仮定した計算モデルにより奥行きを計測している．しかし，実際に用いている光源は，2 つの光源によってそれぞれ異なる光パターンを投影する構成になっている．本節では，2 つの光源を用いることによって生じる誤差を評価する．

図 5.8 に示す状態で較正面に投影される光の反射光強度比について考える．ここでは簡単のために，線光源の長さについては考慮せず，光源からの角度 θ が一定の面内で考える．較正面上の点 P における反射光強度は，光源からの距離の 2 乗に反比例し，入射角の余弦に比例する（すなわち拡散反射を仮定する）とすると，点 P での強度比 ρ は，$Z'' = Z/\sin\theta$ として，

$$\rho = \frac{\min\left(A_0\frac{\cos(\pi/2-\omega_0)}{(Z''/\sin\omega_0)^2}, A_1\frac{\cos(\pi/2-\omega_1)}{(Z''/\sin\omega_1)^2}\right)}{\max\left(A_0\frac{\cos(\pi/2-\omega_0)}{(Z''/\sin\omega_0)^2}, A_1\frac{\cos(\pi/2-\omega_1)}{(Z''/\sin\omega_1)^2}\right)} \tag{5.10}$$

となる．ここで，A_0，A_1 は光源の強度を示す比例定数，ω_0，ω_1 は 2 つの光源から点 P を見た時の角度であり，$\sin\omega_0 = \frac{Z''}{\sqrt{(Y-\Delta Y/2)^2+Z''^2}}$，$\sin\omega_1 = \frac{Z''}{\sqrt{(Y+\Delta Y/2)^2+Z''^2}}$ である．

図 5.9 に，光源間隔 ΔY=25mm とした場合の，Z=1000mm の強度比に対する Z=490mm から 20000mm についての強度比の比を示す．ここで ω は，図 5.8 で 2 光源の中点から被写体を見る角度とし，カメラの垂直視野 15° と同じ範囲についてグラフをプロットしている．2 光源が同位置にある点光源の場合には，光の直進性により角度 ω に対する強度比 ρ の分布は，奥行き Z によらず一定である．よって図 5.9 において，相対強度比の 1 からの偏差が 2 つの光源を上下に配置したことによる影響である．図 5.9 から，$\omega = 90 \pm 7.5°$ の角度範囲

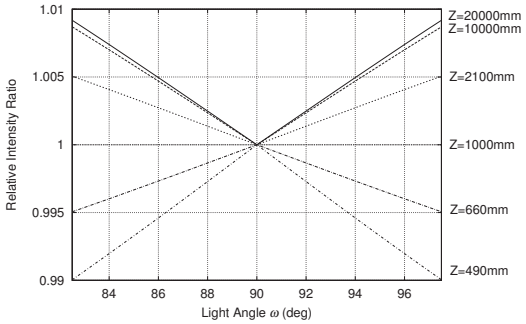


図 5.9: 2 光源の上下配置による強度比への影響

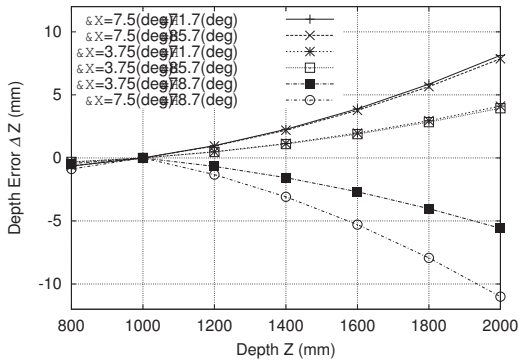


図 5.10: 光源の上下配置による奥行き誤差

での光源の上下配置による強度比の変化は，Z=660mm から 2100mm の奥行き範囲では ±0.5%以下である．

光源の上下配置による奥行き誤差を，図 5.10 に示す．誤差の絶対値は，基準とした奥行き Z=1000mm から離れるにつれて大きくなり，Z=2000mm の場合 11mm 程度になる．

5.3.3　ビデオノイズの影響

本レンジファインダの奥行き計測精度は，基線長とカメラで撮像された画像の S/N により変化する．光源の光強度は，0 度 ∼20 度の角度範囲（カメラの水平視野角の範囲）で変化し，この時映像信号レベルが 30%∼100%まで変化するとする．線光源と遮蔽版を用いる場合，投射光強度は，線光源全体に対して被写体から見える部分の割合で決まる．そこで本節では，投射光強度は，Z 一定の面上で $1/\tan\theta$ と線形な関係にあるとして考える．

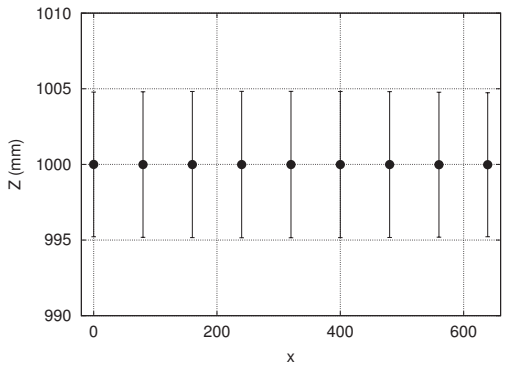


図 5.11: 奥行き画像内の水平位置と奥行き誤差の関係

画像に含まれるビデオノイズは正規分布していると考えてよく，その分散は，入射光量 S に応じて増加する成分と入射光量 S によらない一定成分の和として，$\sigma^2 = \alpha S + \beta$ とモデル化できることが知られている [104]．使用したカメラ（SONY XC–003）とキャプチャボード（CORECO iMAGING Viper-RGB）のトータルノイズ特性を実測し，上記モデルを最小二乗当てはめしたところ，ノイズの分散 σ^2 と 10bit でキャプチャした輝度 I との関係は，$\sigma^2 = 6.00\times10^{-3}I+3.36$ であった．このノイズ特性と，投射パターンの条件，画像上での輝度と，式 (5.1) より奥行き誤差を評価できる．輝度に応じた分散の正規分布乱数を発生させ，各条件について 1 万回の奥行き計算をシミュレーションした．

まず，奥行き 1m，基線長 20cm，入力画像の最高輝度=飽和レベル（最良の露光条件[3]）の条件下で，奥行き画像内の水平位置と奥行き誤差の関係を評価した．奥行き誤差は，図 5.11 に示す様に，水平視野角 20° の奥行き画像内で，水平位置 x の違いによらずほぼ一定である．

上記結果を受け，奥行き誤差と基線長の関係は，奥行き画像中央部に限定して評価した．最良の露光条件についての結果を図 5.12 に示す．奥行き誤差は，基線長を長くすると減少し，同じ基線長でも奥行き Z が大きくなると増加する．

次に，被写体の反射率の影響を評価した．奥行き 1m の被写体測定時の，奥行き画像中央部における，被写体反射率と奥行き誤差の関係を図 5.13 に示す．図において横軸の相対反射率は，露光条件最良の状態を 1 とした時の相対値である．被写体の相対反射率低下に伴い，奥行き誤差の標準偏差は増加する．相対反射率 100%と 10%を較べると，上記標準偏差は 7 倍になっている．

[3]ここでは，レンズの周辺減光は考慮せず，撮像強度変調パターンが画像端部で飽和レベルに達していると考える．

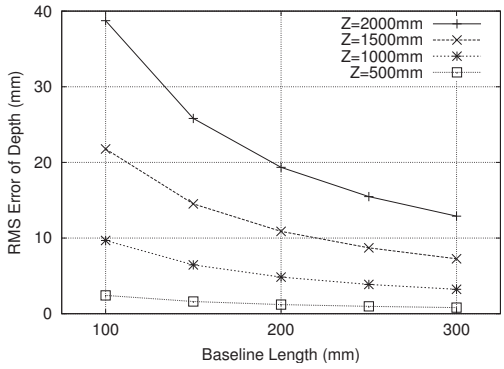


図 5.12: 奥行き誤差と基線長の関係

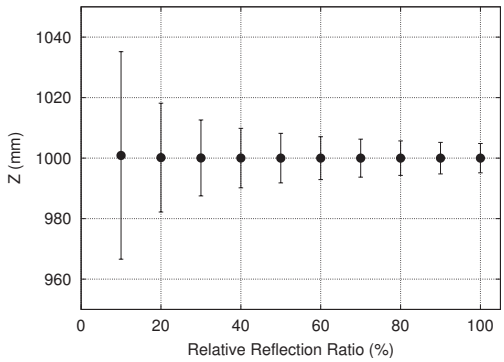


図 5.13: 奥行き誤差と被写体反射率の関係

5.3.4　影境界誤差領域

本方式では2つの光源の位置が上下に微妙に違うため，手前の物体の影が奥の物体に投射される際，上下方向に影の位置がずれる．この時，影のエッジ部分（端の部分）では中間調レベルの明るさの部分が存在し，この部分は正常な輝度値を持つ部分として扱われるため実際とは異なった奥行き値を計算してしまう（図5.14（a）のα部分）．この誤動作した領域を影境界誤差領域と呼ぶことにする．奥行き画像を用い，被写体の存在する位置よりも後ろの奥行き部分または輝度値が小さく光が届いていない部分を背景として判断すると，図5.14（b）のようになり，影の境界部分に細く前景と判断されてしまう影境界誤差領域（図5.14（b）β部分）が生成されてしまう．この，影境界誤差領域を抑制するためには，以下の方法が考えられる．

（1）2光源をなるべく近づける．現状で光源間隔は25mmである．

（2）画像処理により検出する．影境界誤差領域は，オクルージョン領域の

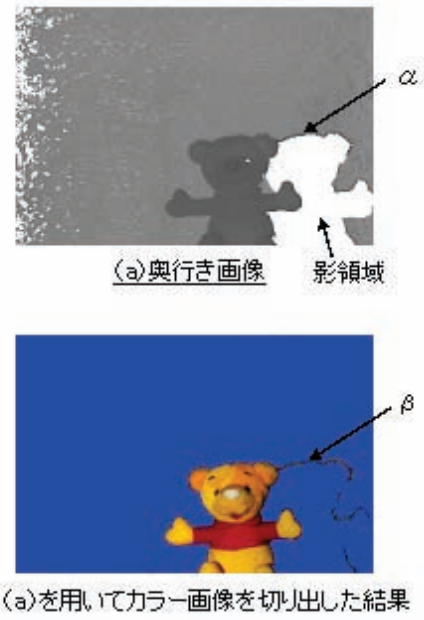


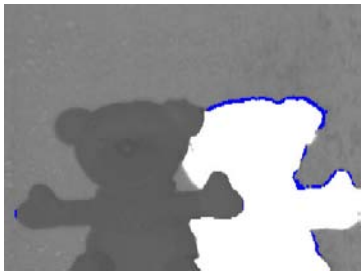
図 5.14: 影境界誤差

周囲で生じる．ここでは，特定の奥行き値より手前に前景の被写体があることを仮定する．奥行きによる判断により前景と判断された領域のうち，背景およびオクルージョン領域と接する領域が，影境界誤差領域である可能性が高い。そこで，前景被写体領域と判断された領域であって，かつ，注目画素を中心とした矩形領域（現在 30×30 画素）中の背景もしくはオクルージョンと判断された部分の画素数があるしきい値より大きい場合，影境界誤差領域として検出する．この時，しきい値は矩形領域の画素数の半分以上に設定する．これは注目画素が前景のエッジ付近にある場合，この部分を背景と判断しないようにするためである．

図 5.15（a）影境界誤差の検出結果,（b）に検出結果を用いた画像切り出し結果を示す．図 5.15（a）を見ると，おおむね影境界誤差の影響を除去できている．また、図 5.15（b）の背景画像を別の画像と入れ替えた画像合成結果を図 5.15（c）に示す．

5.3.5　オクルージョン低減対策

オクルージョン低減対策として，図 5.16 に示すようにカメラに対して反対側にもう一つ光源を設置し，左右のパターン投影により奥行き画像を合成する．2 つの奥行き画像の対応する画素において，両方で奥行き値が得られている場



（a）影境界誤差の検出結果

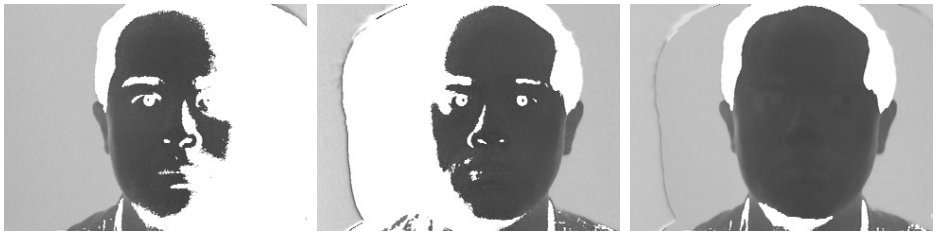
（b）影誤差検出を用いた画像切り出し結果

（c）背景領域に異なる画像を合成した結果

図 5.15: 影境界誤差の検出例・被写体切り出し実験例

合は両者の平均，片方でのみ奥行き値が得られている場合にはその値，両方で奥行き値が得られていない場合は奥行き測定不能（図中白の領域）として，奥行き画像を統合した．図 5.17 は,（a）被写体に向かって左の光源を用いて得られた奥行き画像,（b）同右の光源を用いて得られた奥行き画像,（c）（a）（b）の奥行き画像の統合結果をそれぞれ示す．図 5.17（c）では，2 値化した奥行き画像中での最大閉領域として顔領域を検出し，顔領域内の測定不能領域については，奥行き値の補間による穴埋め処理を施している．光源の 2 セット化により，オクルージョンの影響を低減できていることがわかる．しかし，図 5.17（c）において，背景に影境界誤差が残っていることから，画像処理による影境界誤差の除去と，光源の 2 セット化を併用する必要がある．

図 5.16: 光源を 2 セット化したヘッド部



（a）左側光源による奥行き画像　（b）右側光源による奥行き画像　（c）奥行き画像の統合結果

図 5.17: 奥行き画像の統合例

5.4　実験・検討結果

5.4.1　キャリブレーション方法

カメラ前方に白色の垂直面を配置する．これに対して図 5.2 に示したような 2 種類のパターン光を投影し，その反射光を撮像する．これを複数回繰り返し，2 種類のパターン光に対する平均輝度画像 2 枚を得る（実験では 10 画像の平均値を使用）．これをもとに，同じ座標の画素の輝度値の比と図 5.1 の θ の関係を示すグラフをエピポーラ線毎（実装は 1 フィールドあたり 240 本の各水平走査線毎）に作成する．カメラを水平に設置し，カメラのレンズ中心とストロボ光源の中心が同じ高さになるように配置することにより，エピポーラ線を水平化した．また，2 つの輝度値の大小関係を判断し，必ず比が 1 以下になるように比の取り方を入れ替えることで，比の値が大きな値となることを防ぎ，メモリ利用の効率化を図っている．

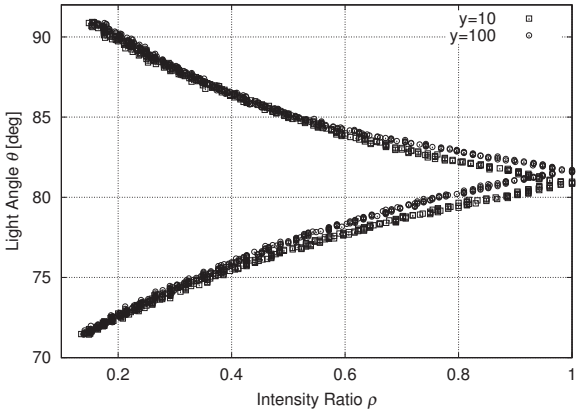


図 5.18: 輝度比と θ の関係の実測値

5.4.2　キャリブレーション結果

長さ ℓ=13.5mm の線光源に間隔 d=30mm で遮蔽版を配置した場合の，輝度比と光源からの角度 θ の関係の実測値を図 5.18 に示す．次に，得られた輝度比–θ グラフを上下 2 領域に分けて，それぞれの領域において 3 次式で近似する変換式を求める．近似曲線の次数は，次数を高くした時の RMS 誤差の減少の程度から決めた．y=100 の上側領域のデータについて，近似曲線の次数を 1 次から 4 次まで変化させると，RMS 誤差は 0.63，0.16，0.096，0.094 度となった．この結果から，近似曲線の次数を 3 とした．図 5.18 の y=100 のデータの場合，近似曲線は上下 2 領域についてそれぞれ $\theta = -12.08\rho^3 + 32.05\rho^2 + 34.02\rho + 95.73$，$\theta = 3.177\rho^3 - 13.36\rho^2 + 23.41\rho + 68.45$ となる．以上のようにして得られた輝度比–θ 変換式を各走査線毎に用意する．

図 5.18 のデータは，垂直 240 ラインのフィールド画像について，10 ライン目（画像上部），100 ライン目（画像中央部）におけるものである．図から，同じ輝度比に対する角度 θ の値が，画像内の場所により，最大で 1° 程度異なることがわかる．

試作したシステムの奥行き計測精度を評価した．基準奥行き面 Z=1000mm に対して，基線長 196mm [4] として 10 組の画像を用いてキャリブレーションした後，Z=1000mm，1250mm，1500mm の奥行きに配置した白色面を各 10 回計測した．計測の際，カメラのレンズ絞りは f=24 に固定した．上記 Z 値に対する被写体面の正規化反射率（飽和レベルで正規化した光量）は，画像中央部でそれぞれ 1.05 [5]，0.66，0.47 である．

[4] 目視による基線長は 200mm である．200mm 付近で 1mm おきに基線長を変化させ，評価面（Z=1000mm，1250mm，1500mm）での奥行き誤差の 2 乗和を最小とする条件から，基線長 196mm とした．

[5] 正規化反射率の定義を，奥行き計測に用いる 2 フィールドの画素値の和と飽和レベルの比

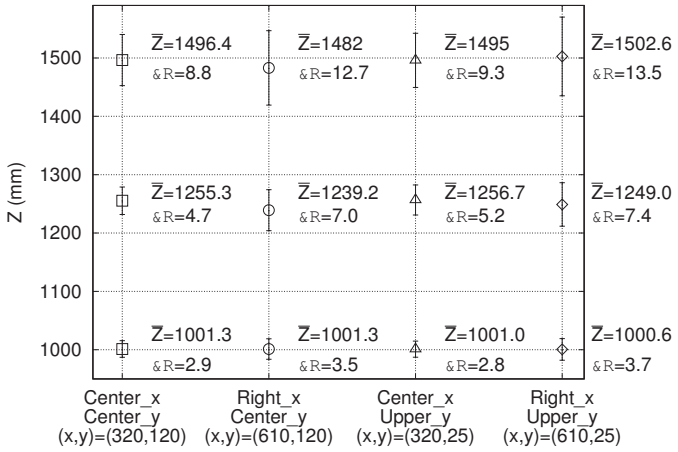


図 5.19: 3 通りの Z 値に配置した白色平板の計測結果

上記 3 通りの奥行きに対して，奥行き画像内の中央と周辺（右，上，右上）の 4 か所に，幅 50 画素 × 高さ 50 画素の窓領域を設定し，精度を評価した．結果を図 5.19 に示す．図中，窓領域内の平均 $\overline{\mathrm{Z}}$ と標準偏差 σ は，10 枚の奥行き画像についてそれぞれ測定した値の平均である．図 5.19 では，窓領域内の Z 値のばらつきをしめすエラーバーは，見やすさのために，標準偏差 σ を 5 倍して示している．

5.4.3 考察

Z=1000mm の奥行きを基線長 200mm で測定する場合，図 5.18 における最大 1° 程度の角度誤差は，奥行き画像中央部において，手前側で 83mm，奥側で 100mm の奥行き誤差となり，無視できない．これに対して，図 5.19 では，奥行き画像内の場所の違いによらず，Z=1000mm に対して誤差の平均は 1mm 程度，標準偏差は 4mm 以下となっている．このことから，エピポーラ線を水平化して走査線毎に輝度比から角度への変換式を用意することによる奥行き測定精度の改善効果が確認できる．

ここで，エピポーラ線の水平線からのずれについて考える．提案方式では基準奥行き面における光強度比の分布に基づいた計算をしているため，基準奥行き面では上記のずれに起因した奥行き誤差は生じないが，基準奥行き面から離れるにつれて奥行き誤差が大きくなる．5.4.2 の結果は，奥行き計算に用いる基線長を微調整することにより，上記誤差も含めて誤差を最小化した結果であ

としている．実際のシステムでは，入力画像の高輝度部分を飽和レベルに近づける様に絞りを調整すると，周辺減光の影響のために，画像中央部で正規化反射率が 1 を越え得る．

ると解釈できる．

なお，試作機による測定値の標準偏差が，図 5.11 のシミュレーション結果より小さくなっているのは，ライン間補間によるビデオノイズ平滑化と，左右2セットのストロボ光源を用いて計測した値を統合しているためである．また，図5.19 において，中央部と比較して周辺部で標準偏差が 1.3 倍程度増加しているのは，周辺減光により輝度の S/N が劣化し，これに伴って輝度比の S/N が低下した影響である．

本節までに検討評価した誤差要因は，誤差が大きい順で

（1）輝度比分布の垂直方向の変化

（2）ビデオノイズ

（3）2つの光源使用

（4）線光源使用

となる．（1）については，エピポーラ線毎に輝度比–角度変換式を用意することで，影響を低減した．（2）の要因による誤差は，被写体が静止している場合には，複数回の計測値を平均化することで低減できる．（1），（3），（4）の要因による誤差は，奥行き値を特定方向にシフトさせる点で，（2）とは性質が異なる．（3），（4）については，奥行き値の補正テーブルを用意するか，異なる奥行きにキャリブレーション面を配置し，測定奥行きと近いキャリブレーション結果による奥行き値を選択することで低減できると考えられる．これは今後の課題である．

5.5　まとめ

被写体の奥行き画像をカラー画像の撮像と同時に得ることができるダブルストロボ方式レンジファインダ技術を開発した．2つのストロボと空間フィルタ（遮光板）で光源を構成し，奥行き計算等の信号処理を PC で行うことで，低コストなシステムを実現した．

輝度比を光源からの角度に変換する係数をエピポーラ線毎（実装は水平ライン毎）に持つことにより，上記変換係数を一組だけ持つ場合よりも計測精度を改善した．

大きさが無視できない光源を用いたために，オクルージョンの境界付近で奥行き誤差が生じることに対し，画像処理による奥行き誤差の低減を図った．

オクルージョン低減対策として，光源を 2 セット化した．

開発したレンジファインダの奥行き計測時の誤差要因について検討した．

試作システムで奥行き 1m から 1.5m に配置した白色被写体を基線長 20cm で測定し，奥行き画像中央部で，奥行き 1m について 2.9mm，奥行き 1.5m について 8.8mm の測定誤差（標準偏差）の性能を実現した．

第6章

結論

本研究は,

（1）3次元映像システムの撮像系，処理系のための奥行き情報を用いた中間視点画像の生成

（2）奥行き情報を用いた画像の階層化のための高速な奥行き情報取得

（3）ネットワーク上に立体コンテンツを流通させるための簡便な奥行き情報取得

を確立することを目的とした.

第1の目的のためには，オクルージョンの取り扱いが課題となる．この課題に対して，ステレオ画像から合成した中間視点画像で，見た目に自然な物体の輪郭を再現するための2つの視差推定方法を提案した.

1つは，中間視点画像の生成時に，視差がブロック内で不連続な領域において，動的輪郭モデルを用いて物体輪郭線の位置を輝度エッジおよび色エッジにより決定し，オクルージョン領域や輝度勾配が小さくて視差推定が困難な領域での視差を，物体輪郭線での視差の不連続を保ちながら周囲の視差をもとに推定する方法である．この方法による視差推定結果を用いて生成した中間視点画像は，前景の輪郭が違和感なく再現されており，中間視点画像の推定精度が向上していることを確認した.

もう1つは，任意形状かつ複数の視差エッジに対する視差推定のための，物体輪郭線に対応する輝度エッジ，色エッジの自動抽出方法と，検出した物体輪郭線の強度に応じて視差が変化する視差推定方法である．この方法では，輝度エッジと色エッジの方向別，解像度別の強度と初期視差推定時の対応付けの信頼性評価値から物体輪郭線を抽出し，その強度に応じて視差分布の滑らかさの拘束を緩めるエネルギーを定義し，物体輪郭線近傍の視差をこのエネルギーを最小化する視差の分布として決定する．この方法において，任意形状かつ複数の物体輪郭線で不連続に変化する視差（視差エッジ）を推定できることを確認した.

第2の目的のためには，ビデオレートで撮影される動画と同じフレームレートで奥行き情報を取得する必要がある．この課題に対して，ビデオレートで動作するレンジファインダの方式を2つ開発した．

第1の方式は，複数のスリット光と複数の赤外カメラを用いた光切断法によるマルチスリット方式レンジファインダである．ここでは，計測距離範囲を限定して各スリット光の画像中での存在範囲を決定した．これにより，1フィールドの画像からスリット光を識別し，ビデオレートの計測を可能とした．複数の赤外カメラによる計測結果を単一視点の距離画像に統合することにより，距離画像の空間解像度を高めるとともに，オクルージョンでの計測値の欠落を補った．

第2の方式は，レーザライン光走査による光強度変調方式レンジファインダである．レーザスリット光を回転ミラーで走査し，フィールド毎に光強度変調パターンを切り替え，2つの投射光の輝度比と画素座標値から三角測量により奥行きを計算することで，全画素についての奥行き値をビデオレートで得た．その際,（1）投射光以外の周囲の光（背景光）による距離測定値のシフト（2）ビデオ信号のノイズによる距離測定値のばらつき（3）被写体の動きによる，被写体の輪郭付近における距離測定誤差の3つの原因により精度が低くなることが課題となった．これに対し,（1）と（2）に対しては，レーザ光源と干渉フィルタを用いた狭帯域光計測を行った.（3）に対しては，動物体の輪郭付近で顕著に生じる距離誤差を低減するための，距離画像のフィールド間メディアン処理を行った．

第3の目的のためには，大がかりな装置や専用の素子を用いずに，誰もが簡便に利用できるシステムが必要である．この課題に対して，簡便な奥行き情報取得のための，ダブルストロボレンジファインダを開発した．カメラに連続2回もしくは4回のストロボ撮影機能を追加し，ストロボ光源の前に位置をずらして窓を配置することで，光走査をせずにグラデーションパターンを得た．信号処理をPC上で行うことにより，簡単に奥行き情報を取得可能にした．この方式では，投射光が変調方向と垂直な方向にも変化したり，光源の大きさが無視できないために，奥行き誤差が生じるので，輝度比を光源からの角度に変換する係数をエピポーラ線毎に持つことによってこの問題を解決した．

以上，立体映像システムとネットワーク上の画像伝送の2つの背景について，本研究では奥行き情報の取得に着目した．受動的な方法におけるオクルージョンの取り扱いと，能動的な方法によるビデオレートでの奥行き情報取得と簡便な奥行き情報取得の3つの課題を抽出した．この課題に対して，筆者の研究成果を示した．

立体映像システムの実現に関して，従来問題とされてきたもののうち，演算量や情報量に起因するものは解消されつつある．また，これまでは放送がほぼ

唯一の伝送形態であったが，今後，これに広帯域ネットワークが加わることは確実である．後者の場合，コンテンツの送り手は一般消費者となる．今後は，コンスーマーによる立体情報取得をより容易にする技術を開発する．そのための課題のひとつは，キャリブレーションに関するものである．ユーザに負担をかけない簡易なキャリブレーション方法，もしくは，キャリブレーションが不要な構成（安定した光源と，ズーム，フォーカスの変化への対応）が必要である．

また，シーンからの奥行き情報の取得に関しては，単に表示のためだけでなく，画像認識，移動体制御，符号化等，さまざまな応用先が考えられる．今後は，これらへの展開を図る．

謝辞

本論文は，筆者が松下電器産業（株）中央研究所（1999 年に先端技術研究所に改名）で行った 3 次元画像生成のための遮蔽領域の視差推定とアクティブレンジファインダの高機能化についての研究をまとめたものです．本研究は，多くの方々の御支援，御協力を得て行うことができました．

はじめに，大阪大学大学院白井良明教授には，筆者が大阪大学工学部在学中の 1989 年に，卒業研究の指導教官として御指導頂きました．以降，本研究に関する 2 件の論文執筆，さらに，本論文をまとめるにあたり一貫して御指導頂きました．心から感謝致します．

大阪大学大学院三好隆志教授，大阪大学大学院三浦純助教授，大阪大学大学院岸野文郎教授には，本論文の内容について御指導と御教示頂きました．深く感謝致します．

松下電器産業（株）中央研究所および先端技術研究所の歴代所長の新田恒治博士，山崎攻氏，江田和生博士（現松下電器産業（株）先端技術研究所技監），松下電器産業（株）知能情報技術研究所所長の丸野進氏，松下電器産業（株）知能情報技術研究所 視覚画像研究グループ グループマネージャの菰淵寛仁博士には，研究の機会を与えて頂きました．ここに深謝致します．

松下電器産業（株）先端技術研究所超圧縮伝送研究チームチームリーダの森村淳氏（現松下電器産業（株）パナソニック システムソリューションズ社 技術本部 開発センター 認識・認証コア技術グループ グループマネージャ）には，著者が 1991 年に松下電器に入社後，10 年に渡り御指導頂きました．仮説と検証を繰り返す技術者としての基本姿勢と，研究における問題設定の重要性を学ばせて頂きました．深く感謝致します．

松下電器産業（株）先端技術研究所超圧縮伝送研究チーム主任研究員の魚森謙也博士（現松下電器産業（株）パナソニック システムソリューションズ社 技術本部 開発センター AV セキュリティプラットフォームグループ グループマネージャ）には、1993 年に松下電器中央研究所の京阪奈地区への移転後、今日に至るまで、直接御指導頂きました．レーザ，回転ミラー等の光学機器の取り扱いを御指導頂くとともに，レンジファインダ開発時に誤差解析と対策について議論・助言を頂きました．また，本研究に関する全ての論文執筆にあたり，

有益な議論を頂きました．本当にありがとうございました．

松下電器産業（株）中央研究所次世代情報処理研究グループ第4研究チームチームリーダの栄藤稔博士（現 DoCoMo Communications Laboratories USA Inc. 社長）には、研究に対する真剣な姿勢を教えられ，また，折に触れ助言を頂いたことに感謝致します．

松下電器産業（株）先端技術研究所 次世代情報処理科学グループの登一生主任研究員（現松下電器産業（株）先端技術研究所 知能情報技術研究所 視覚画像研究グループ 主幹研究員）には，色情報を参照した距離情報の補間に関して有益な議論を頂き，また，レンジファインダのハード化を助けて頂きましたことに感謝致します．

本研究の3章と4章におけるレンジファインダの開発は，通信放送機構（TAO）の委託研究「ISDB 技術の研究開発」として行いました．関係各位に感謝致します．

筆者に教育の機会を与え，学位取得を強く勧めてくれた父健国，母恵豊に感謝します．

数年間に渡り，研究に没頭できる環境を筆者に与え，精神的に支援してくれた妻泰子，息子勇哉に感謝します．

本研究を行うにあたり，ここに紹介できなかった多くの方々からも，ご指導とご助言を頂きました．お世話になりました皆様に心から感謝します．本当に有り難うございました．

参考文献

[1] R. Börner. Progress in projection of parallax-panoramagrams onto wide-angle lenticular screens. In *SPIE Vol.761. True 3D Imaging Technologies*, pp. 35–43, 1987.

[2] S. Pastoor and K. Schenke. Subjective assessments of the resolution of viewing directions in a multi-viewpoint 3DTV system. In *Proc. SID*, Vol. 30, pp. 217–223, 1989.

[3] S. Pastoor and I. P. Beldie. Subjective assessments of dynamic visual noise interference in 3DTV pictures. In *Proc. SID*, Vol. 30, pp. 211–215, 1989.

[4] J. Liu and R. Skerjanc. Construction of intermediate pictures for a multiview 3D system. In *SPIE Vol. 1669 Stereoscopic Displays and Applications III*, pp. 10–17, 1992.

[5] J. Liu and R. Skerjanc. Stereo and motion correspondence in a sequence of stereo images. *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 5, No. 4, pp. 305–318, 1993.

[6] S. Pastoor. Human factors of 3D imaging: Results of recent research at heinrich-hertz-institut berlin. In *IDW'95*, pp. 69–72, 1995.

[7] H. Isono, M. Yasuda, H. Kusaka, and T. Morita. 3D flat-panel displays without glasses. In *Japan Display'89*, pp. 626–629, 1989.

[8] 磯野 春雄, 安田 稔, 三輪 幸司, 金山 秀行, 山田 千彦. 40インチ液晶投写型メガネなし立体TVディスプレイ. テレビジョン学会誌, Vol. 46, No. 4, pp. 518–525, 1992.

[9] 磯野 春雄, 安田 稔, 竹森 大祐, 金山 秀行, 山田 千彦, 千葉 和夫. 8眼式メガネなし3次元テレビジョン. テレビジョン学会誌, Vol. 48, No. 10, pp. 1267–1275, 1994.

[10] 蓼沼 眞, 湯山 一郎. 立体画像の左右対応点探索法の最適化. テレビジョン学会誌, Vol. 48, No. 10, pp. 1222–1229, 1994.

[11] 岸野 文郎. 臨場感通信. 3D 映像, Vol. 4, No. 2, pp. 3–12, 1990.

[12] 大村 克之, 鉄谷 信二, 志和 新一, 岸野 文郎. 複数人観察可能な視点追従型レンチキュラー立体表示装置. 3 次元画像コンファレンス'94 講演論文集, pp. 233–238, 1994.

[13] S. Shiwa and F. Kishino. A new binocular parallax display method in which vergence changes are linked to accommodative responses. In *ASIA DISPLAY'95*, pp. 785–788, 1995.

[14] S. Ichinose, N. Tetsutani, and M. Ishibashi. Full-color stereoscopic video pickup and display technique without special glasses. In *SID*, Vol. 30/4, 1989.

[15] 樋口 和人. 動画ホログラフィーへの挑戦. 3D 映像, Vol. 5, No. 1, pp. 3–11, 1991.

[16] 梶木 善裕, 吉川 浩, 本田 捷夫. 収束化光源列（FLA）による超多眼式立体ディスプレイ. 3 次元画像コンファレンス'96, pp. 108–113, 1996.

[17] N. Hashimoto, S. Morokawa, and K. Kitamura. Real time holography using the high-resolution LCTV-SLM. In *SPIE Proceedings Vol.1461 Practical Holography V*, pp. 291–302, 1991.

[18] D. Marr. *Vision: A Computaional Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information.* W. H. Freeman and Company, 1982.

[19] T. Poggio, V. Torre, and C. Koch. Computational vision and regularization theory. *Nature*, Vol. 317, pp. 314–319, 1985.

[20] T. Poggio, E. B. Gamble, and J. J. Little. Parallel integration of vision module. *Science*, Vol. 242, pp. 436–440, 1988.

[21] S. Geman and D. Geman. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the baysian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-6, pp. 721–741, 1984.

[22] P. Anandan. Computaional framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 2, pp. 283–310, 1989.

[23] S. E. Chen and L. Williams. View interporation for image synthesis. In *COMPUTER GRAPHICS Proceedings of SIGGRAPH'93*, pp. 279–288, 1993.

[24] K. Satoh and Y. Ohta. Passive depth acquisition for 3D image displays. *Transactions on Information and Systems*, Vol. E77–D, No. 9, pp. 949–957, 1994.

[25] 高橋 進, 岩田 藤郎. 視差画像列からの任意視差画像の生成–背景の分離処理–. 第 1 回 Hodic 公募研究会講演論文集, pp. 31–34, 1994.

[26] 片山 昭宏, 田中 宏一良, 押野 隆弘, 田村 秀行. 多視点画像データからの補間処理による視点追従型立体画像表示. 3 次元画像コンファレンス'94, pp. 7–12, 1994.

[27] 苗村 健, 原島 博. 自己相似モデリングによる多眼 3 次元画像の補間と情報圧縮. テレビジョン学会誌, Vol. 48, No. 10, pp. 1215–1221, 1994.

[28] S. E. Chen. QuickTime VR – An image-based approach to virtual environment navigation. In *Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH 95*, pp. 29–38, 1995.

[29] P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and J. Underkoffler. Electronic display system for computational holography. In *SPIE Vol.1212 Practical Holography IV*, pp. 174–182, 1990.

[30] S. A. Benton. Experiments in holographic video imaging. In *SPIE Institute on Holography*, Vol. IS#8, 1991.

[31] T. Okochi. Three-dimensional displays. In *Proc. IEEE*, Vol. 68, pp. 548–564, 1980.

[32] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11. Final draft international standard MPEG–4 visual. ISO/IEC 14496–2, Oct. 1998.

[33] J. Y. A. Wang and E. H. Adelson. Representing moving images with layers. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 3, No. 5, pp. 625–638, 1994.

[34] R. Gvili, A. Kaplan, E. Ofek, and G. Yahav. Depth keying. In *SPIE Vol.5006, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X*, pp. 564–574, 2003.

[35] M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa. Axi-Vision Camera: a three-dimension camera. In *Proc. SPIE*, Vol. 3958D, pp. 61–70, 2000.

[36] G. J. Iddan and G. Yahav. 3D imageing in the studio (and elsewhere...). In *SPIE Vol.4298, Three-Dimensional Image Capture and Applications IV*, pp. 48–55, 2001.

[37] M. Rioux. Laser range finder based on synchronized scanners. *Applied Optics*, Vol. 23, No. 21, pp. 3837–3844, 1984.

[38] Y. Shirai. Recognition of polyhedrons with a range finder. *Pattern Recognition*, Vol. 4, pp. 243–250, 1972.

[39] 吉見 隆, 植芝 俊夫, 大島 正毅. “複数光源によるレンジファインダシステム”. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp. 803–812, 1991.

[40] A. Gruss, S. Tada, and T. Kanade. A VLSI smart sensor for fast range imaging. In *the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 349–358, 1992.

[41] K. Araki, M. Sato, T. Noda, Y. Chiba, and M. Shimizu. High speed and continuous rangefinding system. *IEICE Trans.*, Vol. E74, No. 10, pp. 3400–3406, 1991.

[42] 佐藤 宏介, 井口 征士. 空間コード化による距離画像入力. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 3, pp. 369–375, 1985.

[43] 佐藤 宏介, 井口 征士. 液晶レンジファインダ—液晶シャッタによる高速距離画像計測システム—. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-D, No. 7, pp. 1249–1257, 1988.

[44] 服部 数幸, 佐藤 幸男. スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダ. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1528–1535, 1993.

[45] 田島 譲二, 岩川 正人. Rainbow Range Finder による距離画像取得. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J73-D-II, No. 3, pp. 374–382, 1990.

[46] 吉澤 徹（編）. 光三次元計測, 第 6 章, pp. 114–124. 新技術コミュニケーションズ, 第 2 版（改訂版）, 1998.

[47] B. Carrihill and R. Hummel. Experiments with the intensity ratio depth sensor. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 32, pp. 337–358, 1985.

[48] R. A. Lewis and A. R. Johnston. A scanning laser range finder for a robotic vehicle. In *Proc. 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 762–768, 1977.

[49] D. Nitzan, A. E. Brain, and R. O. Duda. The measurement and use of registered reflectance and range data in scene alalysis. In *Proc. IEEE*, Vol. 65, pp. 206–219, 1977.

[50] J. L. Barron, D. J. Fleet, S. S. Beauchemin, and T. A. Burkitt. Performance of Optical Flow Techniques. In *Proc. Conputer Vision and Pattern Recognition*, pp. 236–242, 1992.

[51] B. K. P. Horn and B. G. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, Vol. 17, pp. 185–204, 1981.

[52] B. D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674–679, 1981.

[53] H. H. Nagel. Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 21, pp. 85–117, 1983.

[54] A. Singh. An estimation-theoretic framework for image-flow computation. In *Third International Conference on Computer Vision*, pp. 168–177, 1990.

[55] T.Kanade and M.Okutomi. A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window : Theory and Experiment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 9, pp. 920–932, 1990.

[56] K. Ikeuchi and B. K. P. Horn. Numarical shape from shading and occluding boundaries. *Artificial Intelligence*, Vol. 17, pp. 141–184, 1981.

[57] R. J. Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Journal of Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 139–144, 1980.

[58] K. Ikeuchi. Determining surface orientation of specular sufaces by using the photometric stereo method. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 3, No. 6, pp. 661–669, 1981.

[59] P. Grossmann. Depth from focus. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 5, No. 1, pp. 63–69, 1987.

[60] T. Darrell and K. Wohn. Pyramid based depth from focus. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 504–509, 1988.

[61] S. K. Nayar. Shape from focus system. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 302–308, 1992.

[62] H. N. Nair and C. V. Stewart. Robust focus ranging. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 309–314, 1992.

[63] S. K. Nayar and Y. Nakagawa. Shape from focus. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 8, pp. 824–831, 1994.

[64] A. Pentland. A New Sense for Depth Field. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 4, pp. 523–531, 1987.

[65] 浅田 尚紀, 藤原 久永, 松山 隆司. 多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77–D–II, No. 6, pp. 1048–1058, 1994.

[66] S. K. Nayar, M. Watanabe, and M. Noguchi. Real-time focus range sensor. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 12, pp. 1186–1198, 1996.

[67] P. J. Giblin and R. Weiss. Reconstruction of surfaces from profiles. In *First International Conference on Computer Vision*, pp. 136–144, 1987.

[68] J. Y. Zheng. Acquiring 3-D models from sequences of contours. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 2, 1994.

[69] P. R. S. Mendonça, K.-Y. K. Wong, and R. Cippolla. Epipolar geometry from profiles under circular motion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, No. 6, pp. 604–616, 2001.

[70] 平田 渥美, 日下 秀夫, 一之瀬 進. 立体像表示技術（1）（メガネ使用，レンチキュラーレンズ使用）. 画像電子学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 235–245, 1991.

[71] 泉 武博監修. 3 次元映像の基礎. オーム社, 1995.

[72] 本田 捷夫, 岩田 藤郎, 樋口 和人. 立体像表示技術 (2) —ホログラフィー—. 画像電子学会誌, Vol. 20, No. 4, pp. 391–402, 1991.

[73] Y. N. Denisyuk. Photographic reconstruction of optical properties of an object in its own scattered radiation field. *Soviet Physics-Doklady*, Vol. 7, pp. 543–545, 1962.

[74] S. A. Benton. Hologram reconstruction with extended incoherent sources. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 59, p. 1454A, 1969.

[75] N. Ahmed, T. Natarajan, and K. R. Rao. Discrete cosine transform. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C–23, pp. 90–93, 1974.

[76] ISO/IEC JTC1/SC2/WG10. Digital compression and coding of continuous-tone still images. ISO/IEC 10918–1, Jan. 1991.

[77] International standard MPEG–1 video. ISO/IEC 11172–2, 1993.

[78] International standard MPEG–2 video. ISO/IEC 13818–2, Nov. 1994.

[79] H. Sawhney and S. Ayer. Compact representation of videos through dominant and multiple motion estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 8, pp. 814–830, 1996.

[80] D. Milgram. Adaptive techniques for photomosaicking. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C–24, pp. 1175–1180, 1977.

[81] P. Burt and P. Anandan. Image stabilization by registration to a reference mosaic. In *Image Understanding Workshop*. ARPA, 1994.

[82] M. Irani, P. Anandan, and S. Hsu. Mosaic based representation of video sequences and their application. In *International Conference on Computer Vision*, pp. 605–611, 1995.

[83] M. Etho and T. Ankei. Parameterized block correlation – 2D parametric motion estimation for global motion compensation and video mosaicing. Technical Report IE97-62, PRMU97-93, MVE97-78, IEICE, 1997.

[84] P. Jailon and A. Montanvert. Image mosacking applied to three-dimensional surfaces. In *12th ICPR*, pp. 253–257, 1994.

[85] R. Szeliski. Video mosaics for virtual environment. *IEEE Computer Graphics and Application*, pp. 22–30, 1996.

[86] T.Fujii and H.Harashima. 3-D image coding based on affine transform. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 5, pp. 577–580, 1994.

[87] R. C. Bolles, H. H. Baker, and D. H. Marimont. Epipolar plane image analysis: An approach to determining structure from motion. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, pp. 7–55, 1987.

[88] P. Fua. Combining stereo and monocular infomation to compute dense depth maps that preserve depth discontinuities. In *Proc. 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 2, pp. 1292–1298, 1991.

[89] 吾妻 健夫, 魚森 謙也, 森村 淳. 中間像生成のためのエッジ情報を用いた視差推定. 3 次元画像コンファレンス'95 講演論文集, pp. 190–195, 1995.

[90] T. Azuma, K. Uomori, and A. Morimura. Disparity estimation with object contour information for synthesizing intermediate view images. In *SPIE Vol.2653, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, pp. 182–188, 1996.

[91] 吾妻 健夫, 魚森 謙也, 森村 淳. 複数のブロックサイズによる動き/奥行き推定値の評価と統合方法. 3 次元画像コンファレンス'94 講演論文集, pp. 33–38, 1994.

[92] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 3, pp. 321–331, 1988.

[93] M. O. Berger and R. Mohr. Towards Autonomy in Active Contour Models. In *Proc. 11th ICPR*, pp. 847–851, 1990.

[94] T. Aach and A. Kaup. Disparity-based segmentation of stereoscopic foreground/background image sequences. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, No. 2/3/4, pp. 673–679, 1994.

[95] 阿部 恭一, 横矢 直和. 探索平面での動的輪郭モデルを用いたステレオマッチング. 第 25 回画像工学コンファレンス, pp. 57–60, 1994.

[96] 吾妻 健夫, 魚森 謙也, 森村 淳. 輝度エッジと初期視差からの視差エッジの自動推定. 3 次元画像コンファレンス'96 講演論文集, pp. 64–69, 1996.

[97] J. Canny. A computational approch to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, pp. 679–698, 1986.

[98] D. Terzopoulos. Regularization of Inverse Visual Problems Involving Discontinuities. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 4, pp. 413–424, 1986.

[99] 横矢 直和. 多重スケールでの正則化によるステレオ画像からの不連続性を保持した曲面再構成. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76–D–II, No. 8, pp. 1667–1675, 1993.

[100] 吾妻 健夫, 登 一生, 魚森 謙也, 森村 淳. マルチスリット方式ビデオレートレンジファインダの開発. 第 5 回画像センシングシンポジウム, pp. 209–214, 1999.

[101] 井口 征士, 佐藤 宏介. 三次元画像計測, 第 4 章, pp. 92–99. 株式会社昭晃堂, 1990.

[102] 河北 真宏, 飯塚 啓吾, 飯野 芳己, 菊池 宏, 藤掛 英夫, 會田 田人. 実時間距離検出カメラ（Axi-Vision カメラ）. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D-II, No. 6, pp. 1267–1278, 2004.

[103] I. Powell. LINEAR DEIVERGING LENS, United States Patent 4,826,299, Date of Patent: May 2, 1989.

[104] 安藤 隆男, 菰淵 寛仁. 個体撮像素子の基礎–電子の目のしくみ, 第 2 章, pp. 43–45. 日本理工出版会, 1999.

研究業績

本研究に関係する研究発表

学術論文

- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．ステレオ画像の中間視点画像生成のためのエッジ情報を用いた視差推定．映像情報メディア学会誌 Vol.52, No.3, pp.100–108, 3 1998.
- 吾妻 健夫，登 一生，魚森 謙也，森村 淳．マルチスリット方式レンジファインダの開発．電子情報通信学会論文誌 Vol.J84–D–II, No.6, pp.1020–1032, 6 2001.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，登 一生，森村 淳．レーザライン光走査による光強度変調方式レンジファインダのビデオレートシステム開発．電子情報通信学会論文誌 Vol.J87–D–II, No.12, pp.2176–2187, 12 2004.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也．ダブルストロボ方式アクティブレンジファインダの開発．電子情報通信学会論文誌 投稿中（2004 年 12 月 1 日採録通知）.

海外講演論文

- T. Azuma, K. Uomori, A. Morimura. Disparity Estimation with Object Contour Information for Synthesizing Intermediate View Images. In *Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, Vol.2653, pp. 182–188, 1996.
- T. Azuma, K. Uomori, A. Morimura. Real-Time Active Range Finder using Light Intensity Modulation. In *Proc. SPIE Three-Dimensional Image Capture and Applications II*, Vol.3640, pp. 11–20, 1999.

国内講演論文

- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．複数のブロックサイズによる動き/奥行き推定値の評価と統合方法．3 次元画像コンファレンス'94, pp. 33–38, 7 1994.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．中間像生成のためのエッジ情報を用いた視差推定．3 次元画像コンファレンス'95, pp. 190–195, 7 1995.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．輝度エッジと初期視差からの視差エッジの自動推定．3 次元画像コンファレンス'96, pp. 64–69, 7 1996.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．マルチスリット方式によるアクティブレンジファインダの性能評価．電子情報通信学会総合大会，D–11–113, p.113, 1998.
- 吾妻 健夫，登 一生，魚森 謙也，森村 淳．マルチスリット方式ビデオレートレンジファンダの開発，第 5 回画像センシングシンポジウム, pp. 209–214, 6 1999.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．光強度変調によるアクティブレンジファンダの性能評価．映像情報メディア学会冬季大会, p.124, 12 1997.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，登 一生，森村 淳．光強度変調を用いたビデオレートレンジファンダの検討．映像情報メディア処理シンポジウム (IMPS99), pp. 49–50, 9 1999.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也，登 一生，森村 淳．光強度変調を用いたビデオレートレンジファンダの開発．電子情報通信学会技術報告, EID2000-310, IE2000-165, pp. 59–64, 1 2001.
- 吾妻 健夫，魚森 謙也．ダブルストロボレンジファインダの開発．映像情報メディア学会技術報告, Vol. 26, No. 7, IPU2002-2, pp. 1–6, 1 2002.

解説記事

- 吾妻 健夫，魚森 謙也，森村 淳．ステレオ画像の中間視点画像生成 —エッジ情報を用いた視差推定—．画像ラボ, Vol.9, No.11, 11 1998.

本研究に関係しない研究発表

学術論文

- 森村 淳，吾妻 健夫，魚森 謙也．広ダイナミックレンジ画像合成処理技術．映像情報メディア学会誌，Vol. 51, No. 2, pp.228–232, 2 1997.
- 吾妻 健夫，小澤 淳．ウェアラブルカメラのためのエッジベース回転補償方式．ヒューマンインタフェース学会誌，Vol. 5, No. 3, pp. 355–362, 8 2003.

付 録A

有限要素法による視差推定の定式化

2.3.3 節における視差推定の詳細について述べる．未対応領域での視差分布 $u(x,y)$ についてのエネルギー E を定義する。

$$E\left(f\left(x,y;u,u_x,u_y\right)\right)=\frac{1}{2}\int_A w(x,y)\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2\right)dxdy \tag{A.1}$$

E が極値を取る条件は、変分 $\delta E=0$ より、

$$\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial x}+w\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}=0 \tag{A.2}$$

となる。式 (A.2) は、$w(x,y)$ が画像の内容に依存するため解析的には解けない。そこで、図 A.1 に示す要素内での視差分布 u を要素についての局所座標値 (x,y) を用いて双一次近似する。

$$u=\boldsymbol{p\alpha}=\begin{bmatrix}1 & x & y & xy\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_0\\ \alpha_1\\ \alpha_2\\ \alpha_3\end{bmatrix} \tag{A.3}$$

ここで、(x,y) についての定数ベクトル$\boldsymbol{\alpha}$は、節点での視差 $u_0\sim u_3$ により、

$$\boldsymbol{\alpha}=\begin{bmatrix}\alpha_0\\ \alpha_1\\ \alpha_2\\ \alpha_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_0\\ u_1-u_0\\ u_2-u_0\\ u_3-u_2-u_1+u_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ -1 & 1 & 0 & 0\\ -1 & 0 & 1 & 0\\ 1 & -1 & -1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_0\\ u_1\\ u_2\\ u_3\end{bmatrix}=\boldsymbol{Ru} \tag{A.4}$$

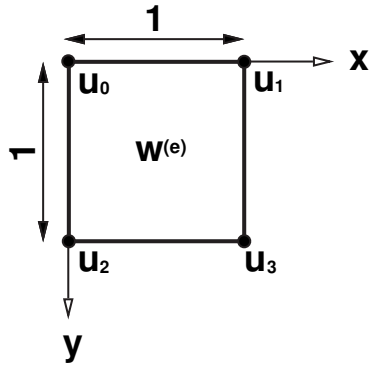


図 A.1: 各要素における局所座標

と表され、視差こう配は、

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial u}{\partial x} \\ \dfrac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} = \nabla \boldsymbol{pRu} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \tag{A.5}$$

と表される。このように視差分布 u を定義した要素内の視差分布エネルギー $E^{(e)}$ は

$$E^{(e)} = \frac{1}{2}\int_A w\,(\nabla u)^2\,dxdy = \frac{W^{(e)}}{2}\int_A \boldsymbol{u^T R^T}(\nabla \boldsymbol{p})^T \nabla \boldsymbol{pRu}dxdy \tag{A.6}$$

となり、極値をとる条件は

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial E^{(e)}}{\partial \boldsymbol{u}} &= \frac{W^{(e)}}{2}\int_A \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{u}} \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}} (\nabla \boldsymbol{p})^T \nabla \boldsymbol{p} \boldsymbol{R} \boldsymbol{u} dxdy \\
&= W^{(e)} \int_A \boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}} (\nabla \boldsymbol{p})^T \nabla \boldsymbol{p} \boldsymbol{R} \boldsymbol{u} dxdy \\
&= W^{(e)} \boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}} \int_A (\nabla \boldsymbol{p})^T \nabla \boldsymbol{p} dxdy \boldsymbol{R} \boldsymbol{u} \\
&= W^{(e)} \boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}} \int_0^1 \int_0^1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & x \\ 0 & y & x & x^2+y^2 \end{bmatrix} dxdy \boldsymbol{R} \boldsymbol{u} \\
&= W^{(e)} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \frac{W^{(e)}}{6} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -2 \\ -1 & 4 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 4 & -1 \\ -2 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \boldsymbol{O} \qquad \text{(A.7)}
\end{aligned}
$$

となる。よって、未対応領域を要素分割し、最低１つ以上の境界条件を与えることにより、各節点における視差についての連立方程式を解いて、視差分布を決定できる。その際、各要素毎に輝度こう配に応じて変化する重みを与えることで、単純な滑らかさの拘束ではなく、輝度こう配に応じて視差を変化させることが可能となる。

付 録B

キャリブレーション方法

第4章で述べたレンジファインダシステムのキャリブレーション方法について，以下に説明する．

B.1　基線長およびミラー回転中心の推定

レーザ走査用回転ミラーの回転中心を，計測範囲内での距離測定精度を最良とするように決定した．光の直進性から，複数の較正面上で光強度比ρが等しい点を結ぶ直線（等ρ線）は，理想的には1点（点光源の位置）で交わる．しかし，実際には光学系の歪，ビデオ系のノイズ，光源の大きさ，画像中心の測定誤差，カメラの光軸設定誤差のために，等ρ線は1点では交わらない．図B.1は，Z=500mm, 600mm, 700mmの較正面上のデータから求めた等ρ線の，回転ミラーの回転中心附近での分布である．今回のシステム化では，較正面における距離測定誤差を小さくするようにミラーの回転中心位置（すなわち基線長）を決定することで，上記誤差要因の影響の低減を図った．

B.2　光強度比，角度特性の較正

距離既知の白色鉛直面にレーザ光を走査し，これをカメラで撮像することにより，光源からの角度と光強度比の関係を得る．光強度比は，第1フィールドと第2フィールドをそれぞれライン間補間し，補間後のフレーム画像で同じ画素座標値での輝度値を用い，式（4.2）より計算する．光源からの角度情報$1/\tan\theta$は，画像の1画素に相当する鉛直面上の長さと光源位置を用いて，各画素について計算する．光源からの角度と光強度比との関係は，上記キャリブレーションデータに最小二乗法により3次式を当てはめて得る．キャリブレーション用の鉛直面の面数が複数の場合にも，同じ方法で3次式を当てはめる．入力画像の階調が各8bitの場合，第1，第2フィールドの輝度に対する全ての組み合わせ（16bit通り）について上記3次式を計算し，1組の入力輝度より光

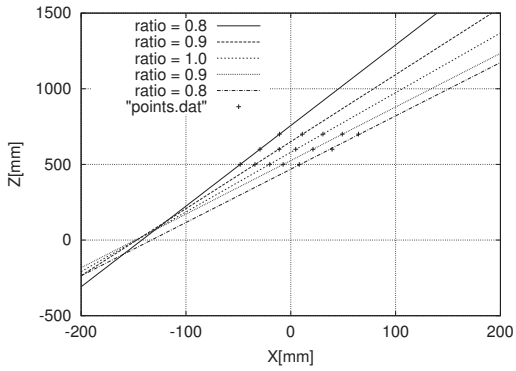


図 B.1: 等光強度比直線の分布

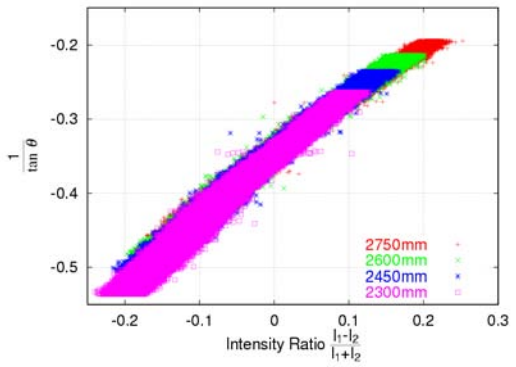


図 B.2: 光強度比と角度情報の関係

源からの角度情報 $1/\tan\theta$ を求める第 1 のテーブルを作る．

三角測量に必要なもう一つの角度情報 $1/\tan\phi$ は，CCD の 1 画素の大きさと焦点距離で決まる．位置，大きさの既知の被写体を撮影することで，画素座標値 y と角度情報 $1/\tan\phi$ の関係が得られる．この関係と基線長を用いて，画素座標値 y と角度情報 $1/\tan\theta$ より距離 Z を求める第 2 のテーブルを作る．

複数の較正面上での光強度比 $\rho = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ と光源からの角度情報 $1/\tan\theta$ との関係を図 B.2 に示す．プロットされた点が幅をもって分布しているのは，ビデオノイズやレーザスペックルによる反射光レベルの変動のためである．図 B.2 において，4 つの異なる距離の較正面上についてのグラフは大部分が重なっており，Z=2300mm における分布（ρ=−0.25 から 0.13 の範囲の分布）の後ろに，Z=2450mm，2600mm，27650mm における分布のほとんどが隠されている．これは，光強度比 ρ と光源からの角度情報 $1/\tan\theta$ の関係が距離によらず一定であるためである．

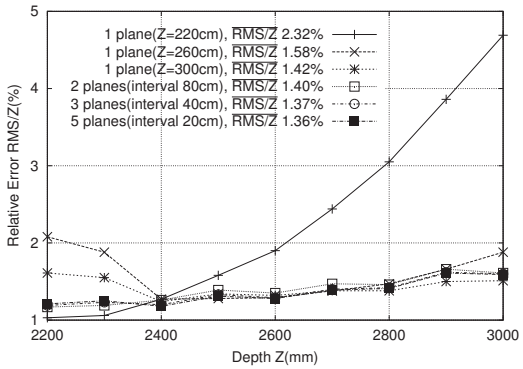


図 B.3: 較正面数と距離誤差の関係

較正面の数を変化させた場合の，距離測定誤差の変化を図 B.3 に示す．較正面が 1 面の場合には，較正面から離れた距離値（特に遠距離側）の計測誤差が大きくなる．異なる Z 値の複数の較正面を用いることにより，計測距離範囲内の距離測定誤差を低減できる．ひとつの距離の較正面だけを用いた場合には，較正面付近の距離については 1%（図 B.3+印，Z=2200mm）から 1.5%（図 B.3∗印，Z=3000mm）の相対 RMS 誤差の距離計測が行えるが，較正面から離れた距離については相対誤差が大きくなり，相対 RMS 誤差は 2.1%（図 B.3× 印，Z=2200mm）から 4.7%（図 B.3+印，Z=3000mm）になる．これに対し，5 面の較正面を用いることにより，図 B.3 中■印で示すように，Z=2200mm から 3000mm の距離範囲について，相対 RMS 誤差を平均 1.36%に低減できている．